

Kantonsschule Zürcher Oberland  
Maturitätsarbeit 2023

# Biologisch abbaubare Werkstoffe

## Biologische Desintegration und Abbaucharakteristik



Feliciano Graf  
N6a  
Betreut von Herr Peter Waser

Abgabedatum: 01.12.2022

## Danksagung

Diese Danksagung gebührt all den Personen, welche mich während dieser Maturitätsarbeit unterstützt und einen enormen Beitrag zur Entstehung dieser Arbeit geleistet haben.

Zuallererst möchte ich meinem Betreuer Herrn Peter Waser danken. Er hat diese Arbeit betreut und zum Gelingen grundlegend beigetragen. Ich bedanke mich für die hilfreichen Vorschläge, die regelmässigen Besprechungen sowie der Freiheit, welche mir beim Bearbeiten dieser Maturitätsarbeit zur Verfügung gestellt wurden.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei meiner Familie, welche mich begleitet und zum Reüssieren dieser Arbeit und des Versuches beigetragen hat. Vor allem möchte ich meine Dankbarkeit für meinen Vater Roland Graf ausdrücken, welcher mich während der gesamten Maturitätsarbeit beraten und motiviert hat. Sein technisches Verständnis und seine Arbeitsmoral haben meine Arbeit grundlegend beeinflusst und den Versuch erst ermöglicht. Nur durch seine Hilfe war es mir möglich, Zugang zu den Messgeräten, welche essenziell für diese Arbeit waren, zu erlangen.

Zusätzlich bedanke ich mich bei Komposta Natura und vor allem bei Herrn Maag, bei welchem ich den Kompost, welcher in dieser Arbeit verwendet wurde, besorgt habe. Durch telefonische sowie persönliche Gespräche konnten meine Fragen beantwortet und mein Versuchsaufbau optimiert werden.

Frau Mirjam Fehlmann danke ich für die Unterstützung bei der Suche des Maturitätsarbeitsthemas, für die Beantwortung von Fragen durch ihre Fachkenntnisse und für ihre Hilfe bei der Ausarbeitung meines Konzepts sowie meines Versuchsaufbaus.

# Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Danksagung</b> .....                                    | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b> .....                                      | <b>4</b>  |
| <b>Glossar</b> .....                                       | <b>5</b>  |
| <b>1 Einleitung</b> .....                                  | <b>11</b> |
| <b>2 Biologisch Abbaubare Werkstoffe</b> .....             | <b>12</b> |
| 2.1 Definition und Terminologie .....                      | 12        |
| 2.2 Normen und Labels .....                                | 13        |
| 2.2.1 Normen für Kompostierbarkeit .....                   | 13        |
| 2.2.2 Labels .....   | 15        |
| 2.3 Systematik.....  | 16        |
| 2.4 Arten .....  | 17        |
| 2.4.1 Mater-Bi .....                                       | 17        |
| 2.4.2 ecovio® .....  | 18        |
| 2.4.3 PLA .....  | 19        |
| 2.5 Geschichte .....                                       | 26        |
| <b>3 Einflussfaktoren für den biologischen Abbau</b> ..... | <b>28</b> |
| 3.1 Polymerspezifische Eigenschaften .....                 | 28        |
| 3.1.1 Struktur .....                                       | 28        |
| 3.1.2 Schmelzpunkt und Kettenmobilität.....                | 28        |
| 3.1.3 Kristallinität.....                                  | 28        |
| 3.1.4 Molekulargewicht .....                               | 29        |
| 3.1.5 Oberfläche .....                                     | 29        |
| 3.1.6 Wasserlöslichkeit.....                               | 29        |
| 3.1.7 Photo-bioabbaubar.....                               | 29        |
| 3.2 Einflussfaktoren in der Kompostierung .....            | 30        |
| 3.3 Abiotische Faktoren .....                              | 30        |
| 3.3.1 pH Wert.....   | 30        |
| 3.3.2 Feuchtigkeit.....                                    | 31        |
| 3.3.3 C/N- Verhältnis .....                                | 31        |
| 3.3.4 Porenvolumen .....                                   | 31        |
| 3.3.5 Temperatur.....                                      | 31        |
| 3.3.6 Standort und Lichtverhältnisse.....                  | 32        |
| 3.4 Biotische Faktoren.....                                | 32        |
| 3.4.1 Mikroorganismen.....                                 | 32        |
| Mikroorganismen während der Kompostierung .....            | 33        |

|  |           |
|--|-----------|
| Bakterien.....   | 34        |
| Archaea .....  | 35        |
| Pilze.....   | 35        |
| 3.4.2 Organismen.....  | 36        |
| Regenwürmer .....  | 36        |
| <b>4 Material und Methode .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>5 Ergebnisse und Diskussion.....</b>                                    | <b>40</b> |
| 5.1 Einflussfaktoren in der Kompostierung .....                            | 40        |
| 5.1.1 Temperatur .....   | 40        |
| 5.1.2 pH-Wert.....   | 41        |
| 5.1.3 C/N-Verhältnis .....   | 41        |
| 5.1.4 Mikroorganismenaktivität .....                                       | 42        |
| 5.2 Biologische Desintegration von biologisch abbaubaren Werkstoffen ..... | 43        |
| 5.2.1 Einhaltung der Richtlinien .....                                     | 43        |
| 5.2.2 Art des Abbaus .....   | 45        |
| 5.3 Begrenzungen .....   | 49        |
| 5.3.1 Temperaturschwankungen.....  | 49        |
| 5.3.2 Analysemethoden für die Kompostierung.....                           | 50        |
| 5.3.3 Analysemethode für den biologischen Abbau.....                       | 50        |
| <b>6 Abschliessende Diskussion.....</b>                                    | <b>51</b> |
| <b>7 Ausblick .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>Quellenverzeichnis.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>Anhang.....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Aufbau Kompost .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>Biozönose .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>Rohmaterialien .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>pH-Wert.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>Proben .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>Datenblätter Wägung .....</b>   | <b>63</b> |

## Abstract

In der vorliegenden Arbeit sollte die Kompostierbarkeit von drei verschiedenen biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) überprüft werden sowie deren Abbaucharakteristik. Es wurden die Materialien Mater-Bi, ecovio® und PLA untersucht, wofür die Bedingungen einer industriellen Kompostieranlage simuliert und die biotischen wie auch die abiotischen Faktoren überprüft wurden. Es wurde sowohl der pH-Wert, die Temperatur, das C/N-Verhältnis und die Biozönose des Komposts während des Versuches ermittelt. Die Proben wurden in ein Gitter verpackt und im Kompost inkubiert, mittels einer Ultramikropräzisionswaage in unregelmässigen Abständen über insgesamt 3 Monate gewogen und der Abbau wurde visuell sowie quantitativ festgehalten. Ecovio® sowie Mater-Bi konnten ihre Richtlinien einhalten und wurden binnen 12 Wochen gänzlich desintegriert, während PLA keinen Massenverlust, aber eine Veränderung der Materialeigenschaften zeigte. Dadurch konnte bewiesen werden, dass nicht die Herkunft der BAW entscheidend für ihre biologische Abbaubarkeit ist, sondern lediglich ihre Struktur und chemische Zusammensetzung.

## Glossar

### A

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>Actinobacteria</b>  | Eine Gruppe von gram-positiven Bakterien, welche eine der artenreichsten Abteilungen innerhalb der Domäne der Bakterien bilden.             |
| <b>amorph</b>          | Ein amorphes Material ist ein Stoff, bei welchem die Atome keine geordneten Strukturen aufzeigen sondern ein unregelmässiges Muster bilden. |
| <b>Additiv</b>         | Zusatzstoff, welcher dem Produkt in geringen Mengen zugefügt wurde, um die Materialeigenschaften zu verbessern.                             |
| <b>Amidbindung</b>     | Auch Peptidbindung; eine amidartige Bindung zwischen der Carboxylgruppe einer Aminosäure und der Aminogruppe der zweiten.                   |
| <b>Archaea</b>         | Archaea sind einzellige Lebewesen, welche zu den Prokaryoten gehören und die 3. Domäne der Lebewesen bilden.                                |
| <b>autokatalytisch</b> | Spezielle Form der Katalyse, bei der das Endprodukt als Katalysator für die Reaktion wirkt.   |

### B

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>B. stearothermophilus</b>       | Grampositives stäbchenförmiges Bakterium.  |
| <b>BAW</b>                         | Kurz für biologisch abbaubare Werkstoffe; Kunststoffe welche durch Mikroorganismen zu CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O und Biomasse umgesetzt werden können. |
| <b>Bioerosion</b>                  | Abtragung durch Organismen.  |
| <b>biobasiert</b>                  | Kunststoff, der aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt ist.   |
| <b>biologisch abbaubar</b>         | Durch natürlich vorkommende Mikroorganismen zu CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O und Biomasse umsetzbar.  |
| <b>Biokunststoffe</b>              | Auch Biopolymere; Sammelbegriff für biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe.  |
| <b>bioresorbierbare Implantate</b> | Implantate, welche vom Körper selbst abgebaut und verstoffwechselt werden können.  |

### C

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Campher</b>               | Chemisch C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> O; ein farbloser Feststoff.   |
| <b>Casein</b>                | Ein tierisches Protein, welches etwa 80 % des Proteinanteils der Kuhmilch ausmacht.  |
| <b>Carbonylgruppe</b>        | Auch CO-Gruppe genannt; sie ist eine funktionelle Gruppe und in vielen chemisch-organischen Verbindungen enthalten.  |
| <b>Celluloid</b>             | Als Celluloid werden eine Gruppe Kunststoff-Verbindungen bezeichnet, welche aus Nitrozellulose und Campher hergestellt werden.   |
| <b>Cellulosehydrat</b>       | Auch Zellglas oder Cellophan ist ein aus Cellulose hergestellter Thermoplast.  |
| <b>Chain Coupling Agent</b>  | Stoff, welcher in der Lage ist, Verbindungen zwischen Polymerketten auszubilden, um eine längere Polymerkette zu kreieren.   |
| <b>chirale Stereoisomere</b> | Eine Art der Stereoisomerie, bei der zwei Moleküle sich spiegelbildlich zueinander verhalten und nicht zur Deckung gebracht werden können, obwohl sie die gleichen Bindungen im Molekül haben. |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>Chitin</b>                | Polysaccharid, welches vor allem in Exoskeletten von Schalentieren zu finden ist.  |
| <b>Compoundierung</b>        | Ein Prozess, bei dem durch Zugabe von Additiven die gewünschten Materialeigenschaften des Kunststoffes erzielt werden sollten.   |
| <b>Copolymer</b>             | Polymer, welches aus zwei oder mehreren Monomereinheiten zusammengesetzt ist.  |
| <b>Copolymerisation</b>      | Eine Sonderform der Polyreaktion, bei der zwei oder mehrere chemisch unterschiedliche Monomere synthetisiert werden.   |
| <b>D</b>                     |  |
| <b>D-Milchsäure</b>          | Auch D-(-)-Milchsäure; D nach Fischer-Projektion, da sich die OH-Gruppe rechts befindet; (-) bezieht sich auf die Drehrichtung von polarisiertem Licht durch eine standardisierte Lösung, also linksdrehend. |
| <b>Dehydrogenase</b>         | Ein Enzym, das durch Abspaltung von Wasserstoffatomen sein Substrat oxidiert.  |
| <b>Desintegration</b>        | Zerfall eines Materials in sehr kleine Fragmente.  |
| <b>Dilactid</b>              | Auch Lactid genannt; zyklischer Diester der Milchsäure.  |
| <b>dimer</b>                 | Ein Molekül, welches meist aus zwei identischen Monomeren besteht.   |
| <b>Dioxygenase</b>           | Ein Enzym, das beide Sauerstoffatome des O <sub>2</sub> -Moleküls auf ein Substrat überträgt.  |
| <b>Duroplast</b>             | Auch Duromer genannt; Kunststoff, welcher nach seiner Aushärtung nicht mehr durch Wärme oder andere Massnahmen verformt werden kann.   |
| <b>E</b>                     |  |
| <b>Elastomer</b>             | Formfeste, elastisch verformbare Kunststoffe.  |
| <b>Enantiomer</b>            | Spezielle Art der Stereoisomerie, bei der die Stereoisomere spiegelbildlich sind.  |
| <b>Ester</b>                 | Chemische Verbindungen, welche durch die Reaktion einer Säure und eines Alkohols unter Abspaltung von Wasser entstehen.  |
| <b>extrazelluläre Enzyme</b> | Enzyme, welche ausserhalb der Zelle verwendet werden, um grosse Moleküle zu spalten.   |
| <b>Extremophile</b>          | Organismen, welche sich extremen Umweltbegegnungen angepasst haben.  |
| <b>Extrusionsprozesse</b>    | Ein Verfahren, bei dem plastisch verformbare Materialien durch Druck aus einer Öffnung gepresst werden.  |
| <b>G</b>                     |  |
| <b>Galalith</b>              | Alter Handelsname für ein Casein-Kunststoff.   |
| <b>Genus Bacillus</b>        | Name einer Gattung von stäbchenförmigen, aeroben Bakterien mit über 200 Arten.   |
| <b>Glastemperatur</b>        | Die Temperatur bei der Polymere von einem flexiblen in einen glasigen, spröden Zustand übergehen; er wird darum auch Erweichungspunkt genannt.   |
| <b>Glycolid</b>              | Dimerer zyklischer Ester der Glycolsäure.  |

**H**

|   |  |
|---|--|
| <b>Hauptkette</b>                       | Eine durchgehende Reihe von kovalent gebundenen Atomen ohne Seitenketten, welche als Kette das Rückgrat eines Makromoleküls bilden.  |
| <b>Heissrottephase</b>                  | Die Phase während einer Rotte, bei der Temperaturen von bis zu 60 °C erreicht werden.  |
| <b>Heteroatome</b>                      | Heteroatome sind in der organischen Chemie Atome, welche nicht Kohlenstoff oder Wasserstoff sind. Oft sind diese Stick-, Sauer- oder Schwefelstoffatome, aber nicht ausschliesslich. Aufgrund der hohen EN von Heteroatomen bilden sie meist polare Bindungen aus. |
| <b>Holz-Kunststoffverbundwerkstoffe</b> | Kombination von Holz und Kunststoffen, bei der eine Vereinigung der jeweiligen Materialeigenschaften erreicht werden soll.   |
| <b>Holzstoff</b>                        | Holzstoff wird aus Holz gewonnen und enthält einen grossen Lignin Anteil.  |
| <b>Homopolymere</b>                     | Polymere, welche nur aus einer Monomer-Art aufgebaut sind.   |
| <b>Humifizierung</b>                    | Zersetzung abgestorbener Substanzen zu Huminstoffen.   |
| <b>Hygienisierung</b>                   | Abtötung von pathogenen (krankheitserregenden) Keimen.   |
| <b>Hyphen</b>                           | Fadenförmige Zellen eines Pilzes oder Bakteriums, welche der Nährstoff und Wasseraufnahme dienen.  |

**I**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>intermolekulare Bindungen</b> | Intermolekulare Bindungen herrschen zwischen den verschiedenen Molekülen untereinander. Sie werden auch Intermolekulare Kräfte genannt und sind im engeren Sinn chemische Bindungen. |
| <b>intramolekulare Bindungen</b> | Intramolekulare Bindungen sind Bindungen, welche innerhalb des Moleküls vorhanden sind.  |
| <b>ionische Polymerisation</b>   | Polyreaktion, welche durch Ionen initiiert wird.   |

**K**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Kettenmobilität</b>           | Die Fähigkeit der Polymerketten sich frei zu bewegen.  |
| <b>Kompostierung</b>             | Auch Rotte; aerobes Verfahren, bei dem organisches Material durch Organismen zu Wasser, Kohlenstoffdioxid und Biomasse abgebaut wird.                                    |
| <b>Kompostmiete kristallin</b>   | Aufgeschichteter Komposthaufen, welcher fertig angelegt wird.<br>Ein Stoff wird kristallin genannt, wenn seine kleinsten Teile eine regelmässige Anordnung aufweisen.    |
| <b>Kristallinität</b>            | Anteile von kristallinen Stellen in einem teilkristallinen Polymer.  |
| <b>kristalline Strukturen</b>    | Stellen mit einer räumlichen, dreidimensionalen regelmässigen Anordnung.   |
| <b>Kristallisationsfähigkeit</b> | Die Fähigkeit eines Feststoffes kristalline Strukturen auszubilden.  |
| <b>Kunststoff</b>                | Synonym für Polymer; eine chemische Verbindung, welche aus Kettenmolekülen (Makromolekülen) besteht, die aus gleichen oder gleichartigen Einheiten (Monomeren) bestehen. |

**L**

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>L-Milchsäure</b> | Auch L-(+)-Milchsäure; L nach Fischer-Projektion, da sich die OH-Gruppe links befindet; (+) bezieht sich auf die Drehrichtung von polarisiertem Licht durch eine standardisierte Lösung, also rechtsdrehend. |
|---------------------|--|



|   |  |
|---|--|
| <b>Lactatdehydrogenase</b>              | Ein Enzym, welches fähig ist Pyruvat in Laktat umzuwandeln.  |
| <b>Lewis-Säure</b>                      | Ein elektrophiler Elektronenpaarakzeptor; zu den Lewis-Säuren zählen Moleküle mit instabilem oder unvollständigem Elektronenoktett.  |
| <b>M</b>                                |  |
| <b>Mesolactid</b>                       | Zyklischer Diester aus L- und D-Milchsäure.  |
| <b>mesophil</b>                         | Lebewesen die einen Temperaturbereich von 20-45 °C bevorzugen.   |
| <b>Mikroorganismen</b>                  | Mikroskopisch kleine Organismen, welche nicht mehr von blosserem Auge zu erkennen sind.  |
| <b>Mineralisierung</b>                  | Zersetzung von Humus zu mineralischen Endprodukten.  |
| <b>Molekulargewicht</b>                 | Synonym für molekulare Masse; die Summe der Atommassen aller Atome in einem Molekül; bei einem Polymer ist dies das Gewicht einer Polymerkette.  |
| <b>Monomer</b>                          | Monomere sind kleine, reaktionsfähige Moleküle, welche zwei oder mehrere funktionelle Gruppen besitzen und sich zu Polymeren zusammenschliessen können.                                      |
| <b>Myzel</b>                            | Die Gesamtheit aller Hyphen eines Pilzes oder Bakteriums.  |
| <b>N</b>                                |  |
| <b>Naturfaserverstärkte Kunststoffe</b> | Es handelt es sich um fossile Kunststoffe, welche mit Naturfasern verstärkt werden, um eine Optimierung der Materialeigenschaften zu erhalten.   |
| <b>Naturkautschuk</b>                   | Ein natürliches Polymer, welches aus dem Milchsaft des Kautschukbaums (Latex) besteht und bei Raumtemperatur gummielastische Eigenschaften besitzt.  |
| <b>nukleophil</b>                       | Die Fähigkeit eines Atoms mit einem freien Elektronenpaar ein positiv geladenes Atom unter Ausbildung einer kovalenten Bindung anzugreifen.  |
| <b>Nylon</b>                            | Markenname für den Kunststoff Polyhexamethylenadipinsäureamid.   |
| <b>O</b>                                |  |
| <b>Oligomer</b>                         | Ein Oligomer ist ein Makromolekül, welches aus vielen gleichen sich wiederholenden Einheiten besteht; bei einer grösseren Anzahl von wiederholenden Einheiten spricht man von einem Polymer. |
| <b>Oxidantien</b>                       | Stoffe, welche in der Lage sind andere Stoffe zu oxidieren und dabei selbst reduziert zu werden.   |
| <b>P</b>                                |  |
| <b>pathogen</b>                         | Krankheitserregend.  |
| <b>PBAT</b>                             | Kurz für Polybutylenadipat-terephthalat; ein biologisch abbaubares Polymer auf fossiler Basis.   |
| <b>PE</b>                               | Polyethylen; thermoplastischer Kunststoff, welcher weltweit am meisten verwendet wird.   |
| <b>PDLA</b>                             | Auch Poly(D-Lactic Acid); PLA Homopolymer aus D-Milchsäure.  |
| <b>PDLLA</b>                            | PLA Copolymer aus D- und L-Milchsäure.   |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Phagozytose</b>             | Die Aufnahme grösserer Partikel durch in Körperflüssigkeiten frei bewegliche Phagozyten.  |
| <b>Photo-bioabbaubar</b>       | Abbau, welcher zuerst durch Photodegradation und anschliessend durch Bioabbau oder Bioerosion vonstattengeht.   |
| <b>Photodegradation</b>        | Ein Prozess, bei dem durch Einwirkung von Licht eine Veränderung von Werkstoffen stattfindet.   |
| <b>PLA</b>                     | Polymer aus Milchsäure.   |
| <b>PLLA</b>                    | Auch Poly(L-Lactic Acid); PLA Homopolymer aus L-Milchsäure.   |
| <b>Plexiglas</b>               | Markenname für Acrylglas; chemisch Polymethylmethacrylat.   |
| <b>Polyester</b>               | Ein Polymer mit Esterfunktionen in ihrer Hauptkette.  |
| <b>Polyhydroxyfett-säuren</b>  | Kurz PHF; ein Biopolyester, der von vielen Bakterien als Reservestoff gebildet wird.  |
| <b>Poly lactide</b>            | Polymer aus Milchsäure, welches durch die Ringöffnungspolymerisation entstanden ist.  |
| <b>Poly(Lactid acid)</b>       | Kurz PLA; Polymer aus Milchsäure, welches durch die direkte Polymerisation synthetisiert wurde; wird grundsätzlich für alle Polymere aus Milchsäure verwendet.      |
| <b>Polykondensation</b>        | Reaktion, bei der Monomere durch eine Vielzahl von Kondensationsreaktionen zu einem Polymer werden.   |
| <b>Polymer</b>                 | Ein Polymer ist eine chemische Verbindung, welche aus Kettenmolekülen (Makromolekülen) besteht, die aus gleichen oder gleichartigen Einheiten (Monomeren) bestehen. |
| <b>Polymerblend</b>            | Ein Gemisch aus zwei oder mehreren Polymeren oder Copolymeren.  |
| <b>Polymerisation</b>          | Ein Sammelbegriff für Synthesereaktionen, bei denen ein oder mehrere Monomere zu einem Polymer synthetisiert werden.  |
| <b>Polymerkette</b>            | Eine Polymerkette ist eine Aneinanderreihung von vielen Monomeren.  |
| <b>Polymerlegierung</b>        | Synonym für Polymerblend; ein Gemisch aus zwei oder mehreren Polymeren oder Copolymeren.  |
| <b>Polyvinylalkohol</b>        | Kurz PVOH; wasserlösliches, synthetisches Polymer des Vinylalkohols.  |
| <b>Polyvinylidenchlorid</b>    | Thermoplast, welcher aus Vinylidenchlorid gebildet wird.  |
| <b>Porenvolumen</b>            | Anteil von Hohlräumen am gesamten Volumen des Bodens in die Wasser oder Luft eindringen können.   |
| <b>Primärporen</b>             | Poren, welche durch die Korngrößenverteilung entstehen.   |
| <b>PP</b>                      | Polypropylen; ein thermoplastischer Kunststoff.   |
| <b>Q</b>                       |   |
| <b>Quervernetzung</b>          | Die Quervernetzung bezeichnet eine Verknüpfung von vielen Makromolekülen zu einem dreidimensionalen Netz.   |
| <b>R</b>                       |   |
| <b>Racemische Milchsäure</b>   | 1:1 Gemisch von D- und L-Milchsäure.  |
| <b>radikalische Reaktionen</b> | Umsetzungen, welche durch Radikale ausgelöst werden beziehungsweise in denen im Verlauf Radikale auftreten.   |
| <b>Radiokarbonmethode</b>      | Ein Verfahren zur Bestimmung kohlenstoffhaltiger Materialien.   |

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Ringöffnungspolymerisation</b>    | Eine spezielle Art der Kettenpolymerisation, bei der ein cyclisches Monomer durch Bindungsbruch zu einem linearen Polymer umgesetzt wird.                   |
| <b>rPET</b>                          | Auch recyceltes Polyethylenterephthalat.  |
| <b>Rückgrat</b>                      | Synonym für Hauptkette; eine durchgehende Reihe von kovalent gebundenen Atomen ohne Seitenketten, welche als Kette das Rückgrat eines Makromoleküls bilden. |
| <b>S</b>                             |   |
| <b>Schlagzähigkeit</b>               | Die Fähigkeit eines Werkstoffes, Stossenergie und Schlagenergie zu absorbieren, ohne dabei zu brechen.  |
| <b>Sekundärporen</b>                 | Poren, welche durch physikalische oder biologische Einflüsse entstehen.   |
| <b>Sporenbildung</b>                 | Mikroorganismen bilden Sporen, um ungünstige Lebensbedingungen zu überdauern.   |
| <b>Stereoisomerie</b>                | Eine Art von Isomerie, bei der die Summenformel sowie die Atomabfolge identisch sind, die 3-D Struktur des Moleküls jedoch nicht.                           |
| <b>T</b>                             |   |
| <b>Teflon</b>                        | Markenname für den Kunststoff Polytetrafluorethylen (PTFE).   |
| <b>teilkristalline Thermoplasten</b> | Thermoplasten, welche sowohl kristalline als auch amorphe Stellen besitzen.   |
| <b>tetraedrisch</b>                  | Dreidimensionale Form eines Tetraeders besitzend.   |
| <b>thermophil</b>                    | Lebewesen (vor allem Mikroorganismen) welche einen Temperaturbereich von 45-80 °C bevorzugen.   |
| <b>Thermoplast</b>                   | Ein Polymer, welches sich in einem gewissen Temperaturbereich verformen lässt.  |
| <b>thermoplastische Stärke</b>       | Thermoplastisches Biopolymer, welches durch Dekonstruktion von Stärkekörnern synthetisiert wird.  |
| <b>thermotolerant</b>                | Organismen, welche hohe Temperaturen tolerieren können, jedoch nicht darin gedeihen.  |
| <b>Thermus/Deinococcus Gruppe</b>    | Abstammungslinie der Bakterien; die Thermus/Deinococcus Gruppe gilt als eine der extremophilsten Bakterienstämme.   |
| <b>Tissue-Engineering</b>            | Künstliche Herstellung von biologischem Gewebe durch Kultivierung von Zellen um krankes Gewebe zu ersetzen.   |
| <b>V</b>                             |   |
| <b>Veresterung</b>                   | Chemische Reaktion bei der aus einer organischen Säure und einem Alkohol unter Abspaltung von Wasser ein Ester gebildet wird.                               |
| <b>Vinylalkohol</b>                  | Vinylalkohol oder auch Ethenol genannt, ist ein ungesättigter instabiler Alkohol mit der Summenformel C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O.                      |
| <b>Z</b>                             |   |
| <b>Zellstoff</b>                     | Faserstoff, welcher vorrangig aus Zellulose besteht.  |
| <b>zyklische Depolymerisation</b>    | Eine Reaktion, bei der ein Polymer in seine Monomere zerlegt wird, welche anschliessend zu zyklischen Produkten weiterreagieren.                            |

# 1 Einleitung

Im Zuge der Verschmutzung von terrestrischen und marinen Umgebungen und der Knappheit an fossilen Rohstoffen haben Biokunststoffe neue Anerkennung gewonnen. Die Verschmutzung der Weltmeere und unseres Planeten stellt heutzutage eine der grössten Herausforderungen dar. Auf den Weltmeeren bildet sich zunehmend ein enormer Teppich aus Plastikabfällen, welcher die Grösse von Mitteleuropa erfasst [1]. Dazu stellt Plastikmüll ebenfalls ein erhebliches Gefahrenrisiko für Tiere in mariner Umgebung dar. Über essbare Meerestiere gelangt dieser Plastikmüll zusätzlich auch in die Nahrungskette der Menschen. Die „biologische Abbaubarkeit“ von Kunststoffen ist somit eine vielversprechende Eigenschaft, welche der Land- und Meeresverschmutzung entgegenwirken könnte. Diese biologisch abbaubaren Werkstoffe besitzen Eigenschaften wie herkömmliche petrochemische Kunststoffe, lassen sich jedoch von Mikroorganismen zu Kohlendioxid, Wasser und Biomasse umsetzen. Um auf diesem innovativen Gebiet Fortschritte zu machen, ist es unabdingbar, die deklarierten Eigenschaften zu überprüfen.

Die folgende Arbeit sollte einen objektiven Einblick in die innovative Thematik der Biokunststoffe geben und es sollte die biologische Abbaubarkeit sowie das Abbauverhalten überprüft werden. Dabei sollte geklärt werden, inwiefern biologisch abbaubare Kunststoffe kompostierbar sind, ob die Kunststoffe die internationalen Normen einhalten, welche mit solch einer Bezeichnung einhergehen; ob es signifikante Unterschiede bei der Abbaugeschwindigkeit respektive der Abbaucharakteristik von den verschiedenen biologisch abbaubaren Werkstoffen gibt und ob diese mit ihrer Herkunft zu erklären sind.

Dafür sollte ein empirischer Versuch durchgeführt werden, bei dem optimale Kompostierungsbedingungen simuliert werden sollen, um die Ergebnisse anschliessend mit den Normen der Kunststoffe zu vergleichen. Im Theorieteil sollte sowohl die Terminologie dieses Gebiets näher beleuchtet werden als auch die Prüfungsverfahren, welche mit den Normen der Kompostierbarkeit einhergehen. Dazu sollten die Einflussfaktoren in der Kompostierung und die polymerspezifischen Einflussfaktoren, welche den biologischen Abbau beeinflussen, präsentiert werden. Bei den Einflussfaktoren in der Kompostierung wird sowohl auf abiotische als auch auf biotische Faktoren eingegangen und die Erkenntnisse sollen anschliessend als Anhaltspunkte für den empirischen Versuch gelten. Es werden ebenfalls die drei biologisch abbaubaren Werkstoffe vorgestellt, welche in Versuchen untersucht werden, wobei auf ihren Aufbau, Abbauverhalten sowie deren Einsatzbereich eingegangen wird.

Zusätzliche Bilder zu dem Versuch und die zusätzlichen Datenblätter der Wägungen befinden sich im Anhang nach dem Tabellenverzeichnis. An passender Stelle im Text wird auf diese Bilder verwiesen.

Nach dem Abstract der Arbeit befindet sich ein Glossar mit den jeweiligen Erklärungen der Fachwörter, welche im Text verwendet wurden. Das Glossar ist alphabetisch geordnet und die Wörter, welche darin erklärt werden, sind bei ihrem ersten Gebrauch im Text mit *Kursivschrift* gekennzeichnet.

## 2 Biologisch Abbaubare Werkstoffe

### 2.1 Definition und Terminologie

*Biokunststoffe* oder auch Biopolymere gehören zu der Gruppe der *Polymere*. Die Vorsilbe „Bio“ kann sowohl bedeuten, dass ein Kunststoff *biobasiert* und/oder *biologisch abbaubar* ist. Ein grundlegendes Problem dieses Fachgebiets der Polymerchemie stellt die uneinheitliche Terminologie dar, wodurch es immer wieder zu Verwechslungen, Irrtümern und Idealisierungen kommt [2]. Hinzukommt, dass es ebenfalls zur Verwirrung der Konsumenten sowie Problemen in der Recycling- und Entsorgungsbranche führt [3]. Denn dadurch, dass nicht alle „Biokunststoffe“ *kompostierbar* oder *vergärbar* sind, kann dies mehr Schwierigkeiten in Kompostieranlagen verursachen. Diese inhomogene Terminologie kann dadurch erklärt werden, dass die internationale Normgenerierung erst seit geraumer Zeit begonnen hat und somit noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird [2].

Die obengenannten Gründe machen die Festlegung eindeutiger Definition sowie eine Erfassung der aktuell geltenden Normen unabdingbar. Dabei sollte eine Orientierung an der Systematik und den Definitionen des BAFU und des Umweltbundesamts erfolgen.

**Biokunststoffe oder Biopolymere** – Biokunststoffe beinhalten sowohl biologisch abbaubare Kunststoffe (*BAW*) sowie biobasierte Kunststoffe. Es fasst somit zwei voneinander unabhängige Begriffe zusammen und würde somit eine weitere Unterteilung zulassen. In Abb. 2 sind die Biokunststoffe sowohl die gelb, grün als auch die blau eingefärbten Kunststoffe. Biokunststoffe müssen somit weder zwingend biologisch abbaubar sein noch aus erneuerbaren Ressourcen gefertigt sein.

**Biologisch Abbaubare Werkstoffe (BAW)** – BAW, die zu der Gruppe der Biokunststoffe gehören, sind Materialien, welche durch *Mikroorganismen* vollständig zu Wasser, Kohlendioxid und Biomasse umgewandelt werden [3]. Es ist somit ein Sammelbegriff für alle Kunststoffe, welche dieses Kriterium erfüllen und es ist nicht definiert, ob diese aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Ressourcen hergestellt werden. Die Abbaubarkeit wird mittels standardisierter Methoden ermittelt. In Abb. 2 werden die verschiedenen Kunststoffe sowie ihre Eigenschaften illustriert. Für die Definition des BAFU und für diese Arbeit werden nur die in Blau und Grün eingefärbten Kunststoffe als BAW bezeichnet, also Kunststoffe, die biologisch abbaubar sind und auf erneuerbaren oder fossilen Rohstoffen basieren, nicht aber biobasierte Kunststoffe, die nicht biologisch abbaubar sind [4].

**Biologisch abbaubar und kompostierbar** – Biologisch abbaubar und kompostierbar bedeutet, dass ein Stoff vollständig durch Mikroorganismen zu Kohlendioxid, Wasser und Biomasse umgewandelt werden kann. Die biologische Abbaubarkeit können sowohl Stoffe aus erneuerbaren wie auch aus fossilen Rohstoffen erfüllen [4].

**Biobasiert** – Biobasiert bedeutet, dass ein Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen wie Mais oder Zuckerrüben aufgebaut ist [3]. Biobasiert impliziert nicht, dass ein Kunststoff auch biologisch abbaubar ist, denn wie man in Abb. 2 sehen kann, gibt es nur teilweise eine Überschneidung mit der biologischen Abbaubarkeit. Kunststoffe, welche nur biobasiert sind, gehören auch zu der Gruppe der Biokunststoffe. Biobasierte Materialien sind



Abb. 1: Zertifikat für biobasierte Produkte

nur selten gänzlich aus nachwachsenden Rohstoffen, sondern sind oft vermischt mit fossilen Bestandteilen. Wie Signifikant die biologischen Bestandteile sind, kann durch Labels quantifiziert werden. Der Nachweis der biobasierten Bestandteile kann durch analytische Verfahren wie der *Radiokarbonmethode* erfolgen, wobei die genaue Vorgehensweise in der amerikanischen Norm ASTM D 6866 [5], auf die sich auch das Zertifikat von Abb. 1 stützt, geregelt ist.

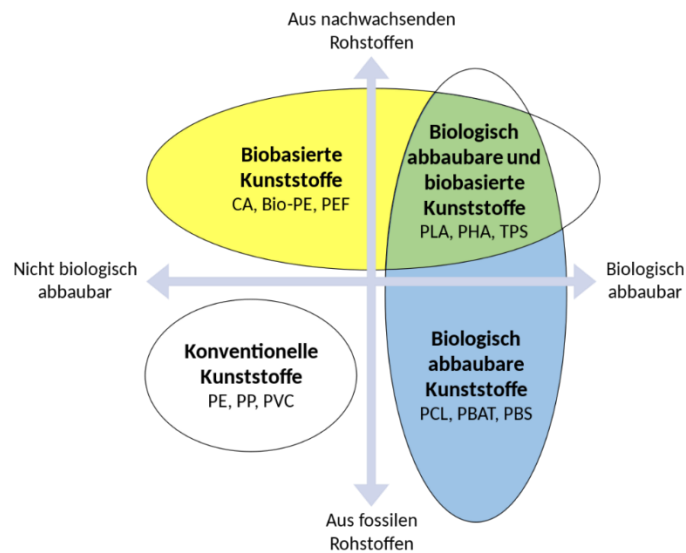


Abb. 2: Abgrenzung von konventionellen, biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen auf nachwachsender und fossiler Basis

## 2.2 Normen und Labels

Es gibt verschiedene Normen und Prüfungsverfahren, um die biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit zu überprüfen und zu quantifizieren. Dazu gibt es auch zahlreiche Labels, welche mit den Normen einhergehen und es ist somit unabdingbar, diese aufzulisten und deren Bedeutungen und Prüfungsverfahren zu erläutern. Denn die deklarierten Normen der Produkte sollten in dem empirischen Versuch überprüft werden, wobei in dieser Arbeit versucht wird, die Prüfung auf Kompostierbarkeit zu simulieren und sich an den bestehenden Prüfungsverfahren zu orientieren.

### 2.2.1 Normen für Kompostierbarkeit

Es gibt sowohl die europäische Norm EN 13432 als auch die amerikanische ASTM D 6400. Diese Normen sind in ihren Grundzügen sehr ähnlich, unterscheiden sich jedoch in einigen Details. Grundsätzlich gliedert sich die Prüfung für kompostierbare Werkstoffe allerdings in fünf verschiedene Teile, wobei die Prüfung auf vollständige anaerobe Abbaubarkeit nur die europäische Norm beinhaltet [6]:

- Chemische Prüfung
- Prüfung auf vollständige biologische Abbaubarkeit
- Prüfung auf Kompostierbarkeit (*Desintegration*)
- Prüfung der Qualität der Komposte
- Prüfung auf vollständige anaerobe Abbaubarkeit

## DIN EN 13432 (Europäische Norm)

**Chemische Prüfung** – Diese Prüfung beinhaltet die Überprüfung auf Schwermetalle und andere Schadstoffe im Boden. Dabei werden die geltenden gesetzlichen Grenzwerte verwendet und um einen gewissen Prozentsatz verstärkt.

**Prüfung auf vollständige biologische Abbaubarkeit** – Bei der Prüfung auf vollständige biologische Abbaubarkeit wird sowohl der Abbau in mariner Umgebung als auch in einer typischen aeroben Kompostierumgebung betrachtet. Für den biologischen Abbau in mariner Umgebung wird das Prüfungsverfahren EN ISO 14851 verwendet, bei dem zwischen 20-25 °C herrschen. Der Abbau wird mittels des freigesetzten Kohlendioxids bestimmt und der Versuch dauert maximal 6 Monate an. Um eine typische aerobe Kompostierbedingung zu simulieren, wird das Prüfungsverfahren EN ISO 14855 herangezogen. Dabei werden die Proben bei 58 °C während 6 Monaten inkubiert, wobei die Abbaurate ebenfalls durch den freigesetzten Kohlendioxid bestimmt wird. Bei beiden Prüfungsverfahren muss nach maximal 6 Monaten ein Abbau von 90 % in Bezug zu einer Referenzsubstanz erreicht werden.

**Prüfung auf Kompostierbarkeit** – Für die Prüfung der Kompostierbarkeit sind keine speziellen Verfahren aufgelistet. Das Produkt sollte jedoch eine technische Prüfung, in der eine typische aerobe *Kompostierung* simuliert wird, bestehen. Die Prüfung dauert 12 Wochen und am Ende werden die Überreste durch ein 2 mm Sieb gesiebt und es dürfen nicht mehr als 10 % der ursprünglichen Masse zurückbleiben. Unter den Bedingungen, die in einer typischen aeroben Kompostierung herrschen oder Realbedingungen wird ein Milieu verstanden, wie es bei einer gut geführten *Heissrottephase* besteht.

**Prüfung auf Qualität der Komposte** – Die Qualität der Komposte werden durch Ökotoxizitätstest mit zwei Pflanzenarten ermittelt. Dazu erfolgt auch eine genaue Charakterisierung des Kompostes, die unter anderem den Nährstoffgehalt beinhaltet.

**Prüfung auf vollständige anaerobe Abbaubarkeit** – Dieses letzte Prüfungsverfahren ist nicht obligatorisch. Diese Prüfungen können wahlweise durchgeführt werden, jedoch muss innerhalb von 2 Monaten ein Abbaugrad von mindestens 50 % erreicht werden [6].

## ASTM D 6400 (Amerikanische Norm)

**Chemische Prüfung** – Diese Prüfung beinhaltet die Überprüfung auf Schwermetalle und andere Schadstoffe im Boden. Man hat sich am US-Amerikanischen Recht orientiert, welches um einen gewissen Prozentsatz (50 %) verschärft wurde. ASTM D 6400 lässt im Vergleich zu der europäischen die höchsten Schadstoffwerte zu [4].

**Prüfung auf vollständige biologische Abbaubarkeit** – Bei dieser Prüfung werden die gleichen Prüfungsverfahren verwendet, wie in der europäischen Norm. Somit wird sowohl der Abbau in mariner als auch unter kontrollierten Kompostierbedingungen überprüft. Dabei muss ein Abbau von 90 % in Bezug zu einer Referenzsubstanz erreicht werden.



Abb. 3: EN 13432  
Zertifikat



ASTM INTERNATIONAL  
Abb. 4: ASTM International  
Logo

**Prüfung auf Kompostierbarkeit** – Bei dieser Prüfung wird der Werkstoff in einem Kompost bei 58 °C inkubiert und nach 12 Wochen durch ein 2 mm Sieb gesiebt, wobei nicht mehr als 10 % des Originalgewichtes als Siebrückstand übrig bleiben darf [7]. Dies stellt das Prüfungsverfahren ISO 20200 dar, welches für die Prüfung auf Kompostierbarkeit verwendet wird. Zusätzlich kann auch eine Prüfung in einer Praxisanlage durchgeführt werden, bei der reale Bedingungen herrschen, wobei der gleiche Abbaugrad erreicht werden muss.

**Prüfung auf Qualität der Komposte** – Bei der Prüfung auf die Qualität der Komposte werden auf Ökotoxizitätstests zurückgegriffen, welche in dieser Norm einen Test durch drei Testpflanzen fordern [6].

## 2.2.2 Labels

Die verschiedenen unabhängigen Organisationen können aufgrund der oben genannten Normen Werkstoffe auf ihre Kompostierbarkeit zertifizieren. Tabelle 1 gibt Aufschluss über die verschiedenen Labels sowie über die Normen und Prüfungsgrundlagen, welche sich dahinter verbergen.





| Organisation<br>(Sitz)          | DIN CERTO<br>(Deutschland)  | AIB Vinçotte<br>(Belgien)   | TÜV Austria<br>(Österreich)  | International<br>Biopolymers<br>Institute US<br>Composting<br>Council (USA)           |
|---------------------------------|---|---|--|---|
| Label                           |  |  |  |  |
| Prüfungs-<br>grundlage/<br>Norm | EN 13432<br>ASTM D 6400   | EN 13432  | EN 13432   | ASTM D 6400   |

Tabelle 1: Verschiedene Labels, welche die biologische Abbaubarkeit überprüfen und die dazugehörigen Normen sowie die Organisation mit dem korrespondierenden Organisationssitz



## 2.3 Systematik

Die Diversität an Biokunststoffen macht eine eindeutige Einteilung aufgrund der Rohstoffe, auf welchen sie basieren und ihren Eigenschaften essenziell. Für die Systematik und Strukturierung wird das Modell des Umweltbundesamtes verwendet, welches 2009 veröffentlicht wurde. Die Biokunststoffe werden in drei elementare Bereiche, welche selbst in verschiedene Teilbereiche gegliedert sind, unterteilt. Dabei werden Biokunststoffe in biologisch abbaubar aus fossilen Rohstoffen, biologisch abbaubar aus nachwachsenden Rohstoffen und biologisch nicht abbaubar diversifiziert [2].

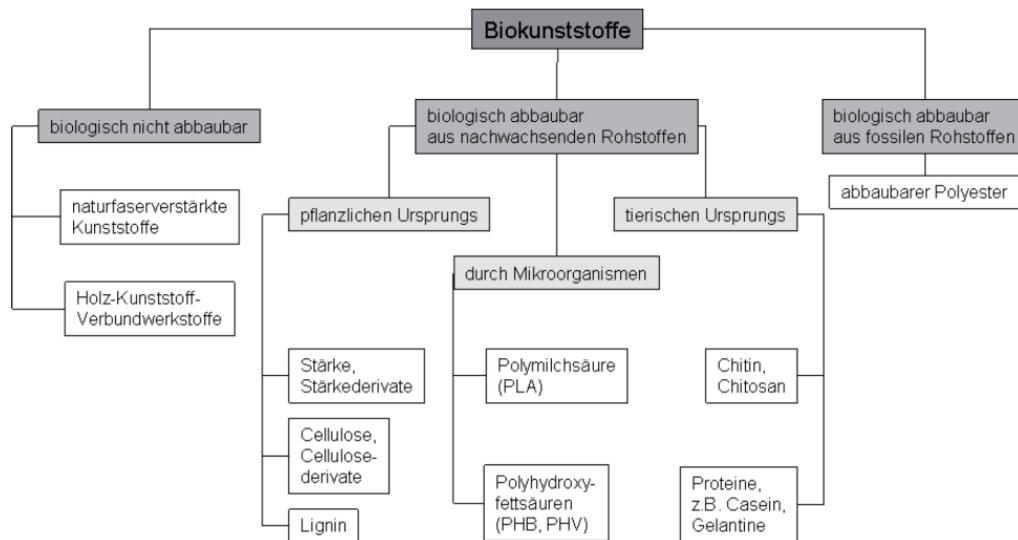


Abb. 5: Systematik von Biokunststoffen in Bezug auf ihre biologische Abbaubarkeit und auf die Rohstoffe

**Biologisch abbaubar aus nachwachsenden Rohstoffen** – Biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind normgemäss biobasiert und biologisch abbaubar. Sie stellen heute den weitaus grössten Marktanteil dar und haben den grössten wirtschaftlichen Stellenwert [2]. Aufgrund der grossen Vielfalt und Varietät werden sie in drei Unterkategorien in Bezug auf ihre stoffliche Herkunft aufgeteilt.

- **Tierischen Ursprungs** – Biologisch abbaubare Werkstoffe können durch tierischen Ursprung entstehen. Somit ist die Herstellung von Biokunststoffen durch Panzer von Schalentieren wie *Chitin*, das aus Krabbenschalen gewonnen wird und aus tierischen Proteinen wie *Casein* möglich [8].
- **Pflanzlichen Ursprungs** – Die wohl wichtigste Unterkategorie der biologisch abbaubaren Werkstoffe stellen die BAW pflanzlichen Ursprungs dar. Der wichtigste Vertreter dieser Unterkategorie stellt die *thermoplastische Stärke* dar, welche einen Anteil von 80 % am Gesamtmarkt der Biokunststoffe hat. Um thermoplastische Stärke herzustellen, müssen Stärkekörner durch *Extrusionsprozesse* dekonstruiert und modifiziert werden. Um die Stärke zu dekonstruieren, muss durch *Weichmacher*, mechanische Energie und Wärme die Struktur und *Kristallinität* der Stärke zerstört werden. Weitere Vertreter dieser Kategorie stellen Werkstoffe aus Lignin und Cellulose dar, welche ebenfalls durch Modifikation hergestellt werden [2].

- **Durch Mikroorganismen** – Eine weitere Unterkategorie stellen die Biokunststoffe dar, welche durch Mikroorganismen synthetisiert werden. Der bedeutendste Vertreter dieser Unterkategorie stellt die Polymilchsäure (*PLA*) dar, welche durch ein biologisch-chemisches Verfahren aus Zucker und Stärke synthetisiert wird [8]. Dabei stellt der erste Verfahrensschritt die Fermentation von Stärke zu Milchsäure durch Mikroorganismen dar und der zweite die *Polymerisation* zu Polymilchsäure [5]. Eine Vertiefung der Synthese von PLA findet im Kapitel 2.43 statt. Ein weiteres rein biologisches Verfahren stellt die direkte Extraktion aus den Zellen der Mikroorganismen dar. Die bekanntesten Vertreter dieser Kategorie sind die *Polyhydroxyfettsäuren (PHF)*. Die Mikroorganismen speichern PHF nämlich als Reservestoff in ihren Zellen, was eine direkte Extraktion ermöglicht [2].

**Biologisch abbaubar aus fossilen Rohstoffen** – Da Biokunststoffe nicht zwangsweise mit einer nachwachsenden Rohstoffquelle einhergehen müssen, gibt es auch Biokunststoffe auf fossiler Basis. Diese petrochemischen Biokunststoffe sind aufgrund ihrer vorteilhaften physikalischen Eigenschaften gut für *Compoundierungen* mit thermoplastischer Stärke oder mit PLA geeignet [9]. Diese Compoundierung mit PLA wird noch genauer im Kapitel 2.42 beleuchtet.

**Biologisch nicht abbaubar** – Diese Kategorie beinhaltet biologisch nicht abbaubare Kunststoffe, welche aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden [2]. Die *naturfaserverstärkten Kunststoffe* stellen eine wichtige Werkstoffklasse dar. Hierbei handelt es sich um fossile Kunststoffe, welche mit Naturfasern verstärkt werden, um eine Optimierung der Materialeigenschaften zu erzielen. Eine weitere wichtige Unterkategorie stellen die *Holz-Kunststoffverbundwerkstoffe* dar, welche durch die Kombination von Holz und Kunststoffen erfolgt. Dabei sollte eine Vereinigung der jeweiligen Materialeigenschaften erreicht werden. Der primäre Einsatzbereich der Holz-Kunststoffverbundwerkstoffe und der naturfaserverstärkten Kunststoffe ist vor allem in der Automobilindustrie [8]. Diese Kategorie wird jedoch in dieser Arbeit nicht weiter vertieft, da sich die Arbeit auf biologisch abbaubare Werkstoffe fokussiert.

## 2.4 Arten

Die Vielzahl an verschiedenen BAW überschreitet die Dimension dieser Arbeit, jedoch werden hier drei verschiedene Bioplastikarten, welche auch für den Versuch relevant sein werden, genauer erläutert. Es wird auf den Aufbau, die Einsatzbereiche, die Produkteigenschaften und den Abbau eingegangen, wobei auch die Zertifikate aufgelistet werden, welche schlussendlich als Anhaltspunkt für die empirischen Ergebnisse des Versuches gelten sollten.

### 2.4.1 Mater-Bi

Die italienische Firma Novamont ist ein Vorreiter auf dem Gebiet der biologisch abbaubaren Kunststoffe und hat Mater-Bi entwickelt [10]. Mater-Bi ist ein Stärkeblend und besteht somit aus thermoplastischer Stärke und einem anderen Polymer auf Erdölbasis oder auf der Basis nachwachsender Rohstoffe. Das Material besteht zu 40 % bis 90 % aus nachwachsenden Rohstoffen und einem anderen Copolymer eines *Vinylalkohols* [11].

Es ist wichtig, dass hier der Unterschied zwischen einem *Copolymer* und einem *Polymerblend* (bzw. *Polymerlegierung*) erläutert wird. Letzterer ist eine physikalische Mischung zweier

Polymere, während ein Copolymer ein Polymer bestehend aus verschiedenen *Monomeren* ist, wie man in Abb. 6 erkennen kann. Ein Copolymer entsteht durch die *Copolymerisation*.

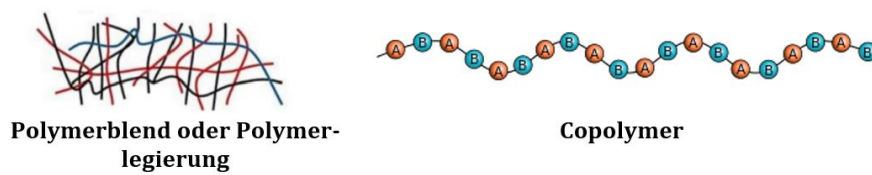


Abb. 6: Polymerblend (links) mit drei verschiedenen Polymeren, Copolymer (rechts) mit den Monomeren A und B

Bei dem biologischen Abbau von Mater-Bi bauen sich die Komponenten aus Stärke schneller ab als die petrochemischen, da sie nicht zuerst hydrolysiert werden müssen, sondern sofort von Mikroorganismen konsumiert werden können, ohne in Monomere gespalten zu werden [12]. Die biologische Abbaubarkeit wird durch eine Vielzahl von Zertifikaten bekräftigt, welche in der Abb. 7 aufgezeigt sind.



Abb. 7: Zertifikate für die biologische Abbaubarkeit vom Material Mater-Bi

Mater-Bi ist ein besonderer Werkstoff, da er Eigenschaften hat, welche leicht mit *Polyethylen (PE)* vergleichbar sind. Dazu ist es auch recycelbar und kann bis zu viermal wiederverarbeitet werden. Hinzu kommt, dass das Material ohne jegliche Vorbehandlung bedruckbar und antistatisch ist, wobei es ebenfalls eine sehr gute Sauerstoffbarriere hat. Jedoch sind die Materialeigenschaften teilweise von der Temperatur und der Feuchtigkeit abhängig. So führt eine hohe Luftfeuchtigkeit zu einer erhöhten Elastizität, während eine tiefe Luftfeuchtigkeit die Steifigkeit des Materials verstärkt [11]. Das Material wird sowohl für landwirtschaftliche Produkte wie Mulchfolien oder Pflanzentöpfe als auch für die Gastronomie und Bioabfallsäcke verwendet [13].

#### 2.4.2 ecovio®

Ecovio® ist ein Copolymer, hergestellt von der Firma BASF mit Sitz in Ludwigshafen am Rhein. Es ist teilweise biobasiert und gänzlich biologisch abbaubar. Es ist durch eine Vielzahl von Normen zertifiziert worden, wie die Abb. 8 illustriert. Vor allem wird das Copolymer für Abfalltüten für Bioabfälle, Gemüse- und Früchtebeutel, Einkaufssäcke oder Mulchfolien verwendet. Dazu sind ecovio® Produkte sehr widerstandsfähig und genauso stark in Gebrauch wie herkömmlicher Plastik. Somit stehen sie ihren petrochemischen Konkurrenten wie Polyethylen (PE) in nichts nach [14].

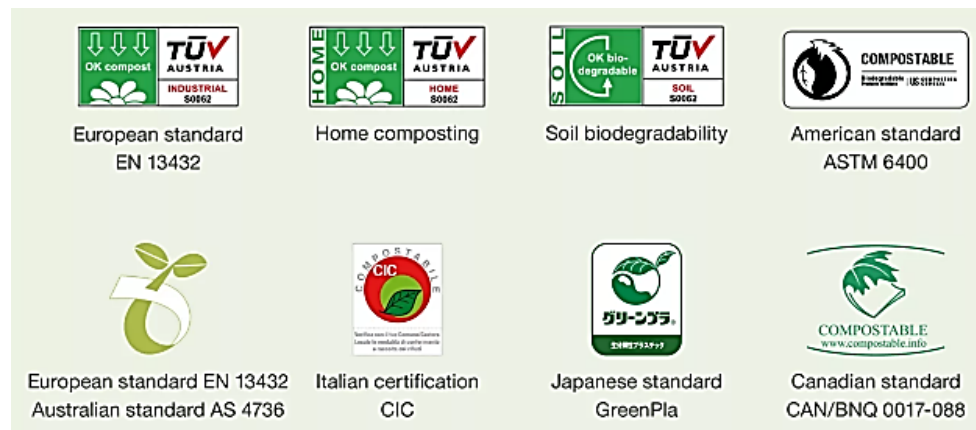


Abb 8: Zertifikate für den biologisch abbaubaren Kunststoff Ecovio®

Ecovio® besteht aus zwei verschiedenen Polymeren PBAT und PLA. Auf die Eigenschaften von PLA wird ausführlich im Kapitel 2.43 eingegangen und somit wird sich dieser Abschnitt stärker mit dem Copolymer PBAT befassen. PBAT oder Polybutylenadipat-terephthalat ist kommerziell unter dem Markennamen *ecoflex®* erhältlich, welcher ebenfalls von der Firma BASF patentiert wurde. PBAT ist ein biologisch abbaubarer Werkstoff auf fossiler Basis. Er hat sehr ähnliche Eigenschaften wie Polyethylen und eignet sich dadurch für Lebensmittelverpackungen und landwirtschaftliche Folien [15]. Dazu ist er auch ein perfekter Partner für Biokunststoffe aus erneuerbaren Ressourcen, wie die Abb. 9 illustriert. Denn erst durch PBAT können gewisse Anwendungen möglich werden, da es die physikalischen Eigenschaften der ursprünglichen Polymere verbessert. So kann PBAT das Copolymer *ecovio®* mit Werkstoffeigenschaften von Flexibilität bis Zähigkeit ausstatten, wobei diese Eigenschaften beeinflusst und auf das Produkt massgeschneidert werden können [14].

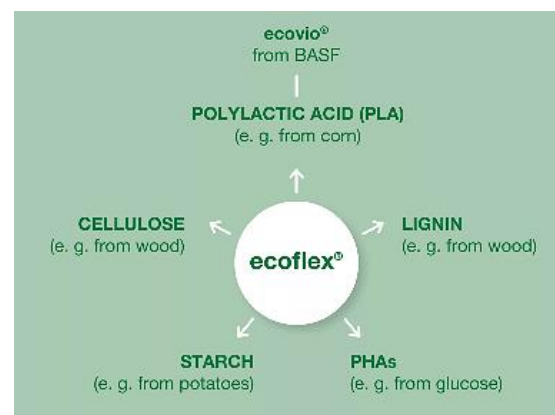


Abb. 9: Darstellung der möglichen Copolymere auf Basis von *ecoflex®*

### 2.4.3 PLA

PLA oder auch *Poly(Lactic Acid)* ist ein Polymer, welches aus den Monomeren Milchsäure besteht. Es lässt sich in die Gruppe der *Polyester* einteilen, die teilweise synthetisch hergestellt werden und gehört zu der Gruppe der biologisch abbaubaren Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Wichtig ist die Differenzierung von *Poly(Lactic Acid)* und *Poly lactide*, denn obgleich austauschbar benutzt, gibt es wissenschaftlich gesehen einen grundlegenden Unterschied. Denn *Poly lactide* beschreibt das Polymer, welches durch die *Ringöffnungspolymerisation* synthetisiert wird, während *Poly(Lactic Acid)* das durch die direkte Polykondensation entstandene Polymer beschreibt. Grundsätzlich wird jedoch der Begriff *Poly(Lactic Acid)* oder PLA für alle Polymere verwendet, welche von Milchsäure produziert werden.

Milchsäure ist der Grundbaustein von PLA und ist chemisch gesehen 2-hydroxy-propionic acid. Dazu hat Milchsäure zwei *chirale Stereoisomere* L (+) und D (-) und durch ihre spiegelbildliche geometrische Anordnung sind L (+) und D (-) *Enantiomere*, wie in Abb. 10 illustriert. Ein 1:1

Gemisch von L und D- Milchsäure wird als *racemische Milchsäure* bezeichnet und wird von einigen Bakterien produziert. Der Grossteil der global produzierten Milchsäure wird durch Fermentation von Kohlenhydraten wie Stärke oder Zellulose gewonnen. Dafür werden verschiedene Bakterien verwendet, welche imstande sind, Milchsäure zu produzieren. Von der Vielzahl der Arten von Bakterien, welche Milchsäure produzieren, sind die Lactobacillus wohl die wichtigsten. Sie beinhalten rund 80 Milchsäure produzierende Arten. Es gibt darunter auch Arten, welche nur das Enantiomer D-Milchsäure und solche, die eine Mischung aus L- und D- Milchsäure produzieren können. Ob das Enantiomer *D-Milchsäure* oder *L-Milchsäure* entsteht hängt von den Enzymen in den Bakterien ab, da dafür verschiedene Lactatdehydrogenasen benötigt werden [16]. Aus den beiden Enantiomeren können drei mögliche Stereoisomere des *dimeren Dilactid* entstehen: L,L-Lactid; D,D-Lactid und das cyclische *Mesolactid*.

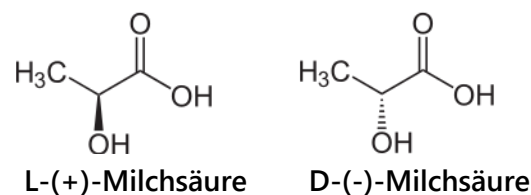


Abb. 10: Strukturformel der beiden Enantiomere L-Milchsäure und D-Milchsäure

Je nachdem, welches der drei Dilactide für die PLA-Produktion verwendet wird, entstehen die Homopolymere Poly(L-Lactic Acid) oder auch PLLA, das Poly(D-Lactic Acid) PDLA oder das Copolymer PDLLA, wie die Abb. 11 zeigt. Das Homopolymer PLA hat eine *Glasübergangstemperatur* von 60 °C und ist somit sehr brüchig, verfügt aber über eine hohe Festigkeit [17]. Die Homopolymere PDLA und PLLA weisen beide *kristalline Strukturen* auf, während sie mit steigendem Anteil des anderen Stereoisomers die *Kristallisationsfähigkeit* verlieren und *amorph* werden [8]. Der Anteil von D oder L-Milchsäuren im Polymer ändert somit unter anderem die Werkstoffeigenschaften und somit die Einsatzbereiche. Die biologischen Abbauezeiten sind verschieden, je nachdem wie hoch der Anteil von L-Milchsäure ist. So lassen sich durch gezielte Kombination von L- und D-Lactiden oder durch Zugabe von *Additiven* auch PLA-Typen herstellen, welche auch bei hohen Gebrauchstemperaturen noch formbeständig sind [18].

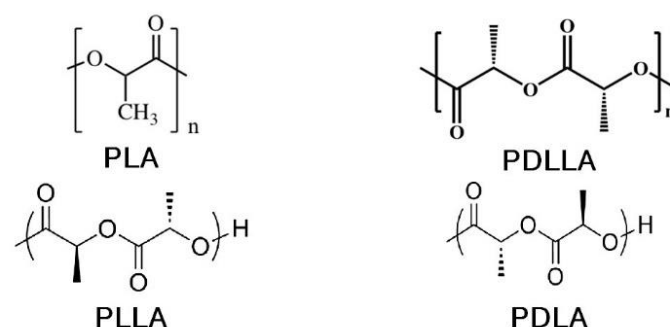


Abb. 11: Die verschiedenen PLA-Typen aus den beiden Stereoisomeren

Dazu wird PLA oft auch durch gezielte Copolymerisation auf gewisse Anwendungen massgeschneidert. Dies wurde bereits am Beispiel von ecovio<sup>®</sup> betrachtet (siehe S. 18), welcher ein PLA/PBAT- Copolymer darstellt. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Copolymeren und Blends, welche auf der Basis von PLA entwickelt wurden und PLA mit verschiedensten Eigenschaften ausstatten können.

PLA hat einen breiten Anwendungsbereich, denn durch seine hohe Festigkeit und Transparenz eignet es sich optimal für Folien, Becher und Behälter. Dazu lassen sich auch Trinkbecher für Heissgetränke aus PLA herstellen. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Wasserdampfbarriere, welche PLA besitzt und somit für Anwendungen, welche eine Atmungsaktivität benötigen, wie zum Beispiel Verpackungen von Brot und Gemüse, optimal ist.

Des Weiteren kann PLA auch nicht nur als Gebrauchsgegenstand oder für kurzlebige Produkte verwendet werden, sondern hat auch ein enormes Potenzial für langlebige Anwendungen. Durch Naturfaserverstärkung kann PLA auch für Handyschalen oder für Teile der Armaturentafel bei Autos eingesetzt werden. Dazu findet PLA auch Anwendung in den Bereichen Textilien oder Autositzbezügen.

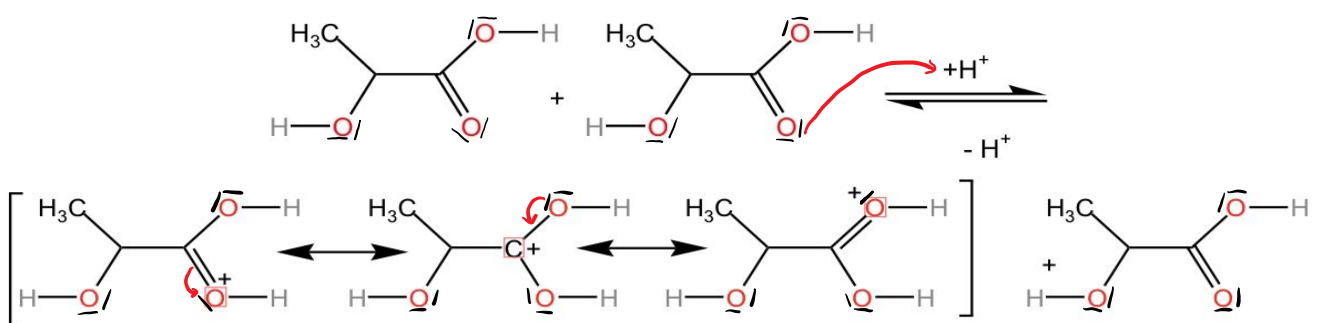
Ein weiterer lukrativer Markt, in dem PLA eine essenzielle Rolle einnimmt, ist die Biomedizin. Dort wird es unter anderem für *bioresorbierbare Implantate* wie Schrauben und Nägel und andere Implantate zur Stabilisierung von Knochenbrüchen verwendet. Dadurch, dass der Körper die Implantate von selbst abbauen respektive in den Stoffwechsel einschliessen kann, bleibt dem Patienten eine Zweitoperation erspart [18]. Für biomedizinische Anwendungen wird vor allem PLA aus L-Milchsäure verwendet [19], da solche Implantate problemlos vom Körper aufgrund der vorhandenen Enzyme abgebaut und das Monomer aufgenommen werden kann, während dies mit dem Stereoisomer D-Milchsäure nicht möglich ist.

PLA nimmt auch eine wichtige Rolle im *Tissue-Engineering* ein. Dort ist es wichtig, die Abbauphase auf das nachwachsende Gewebe abzustimmen. Deswegen werden PLA Copolymere verwendet, wobei normalerweise als Copolymer *Glycolid* verwendet wird. Das endgültige Ziel ist schlussendlich, dass das Implantat aus PLA vollständig durch das Gewebe vom Patienten ersetzt wird. Zusätzlich werden PLA Copolymere auch als Wirkstoffträger verwendet. Diese Wirkstoffträger transportieren ein Medikament, welches effizient zu den betroffenen Zellen geschickt und anschliessend durch den sukzessiven Abbau des Wirkstoffträgers kontrolliert freigesetzt wird. Diese Wirkstoffträger werden unter anderem verwendet, um Brust- und Prostatakrebs zu behandeln [19].

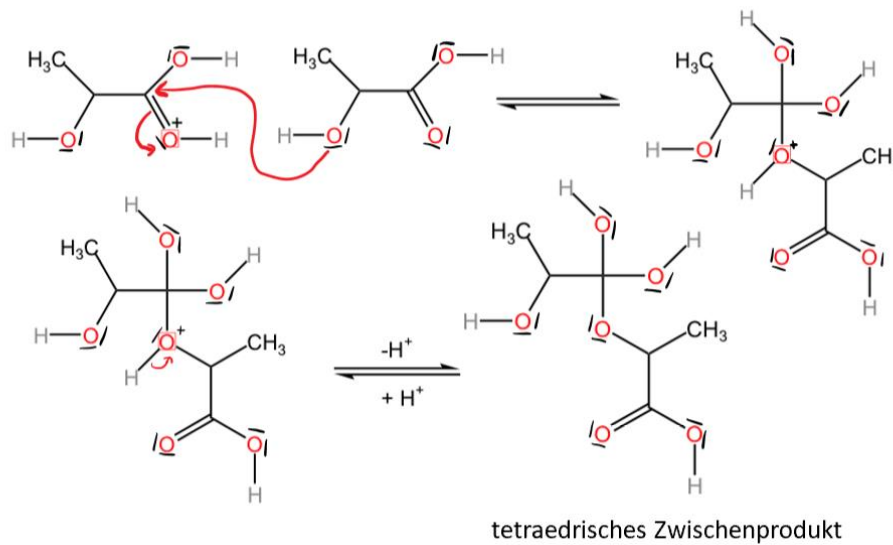
## Synthese

Die Synthese von PLA stellt eine *Polykondensation* und eine anschliessende Ringöffnungspolymerisation dar. Die anfängliche Polykondensation von Milchsäure ist möglich, da Milchsäure die für die *Veresterung* nötige Carboxy- und Hydroxygruppen in einem Molekül enthält [8].

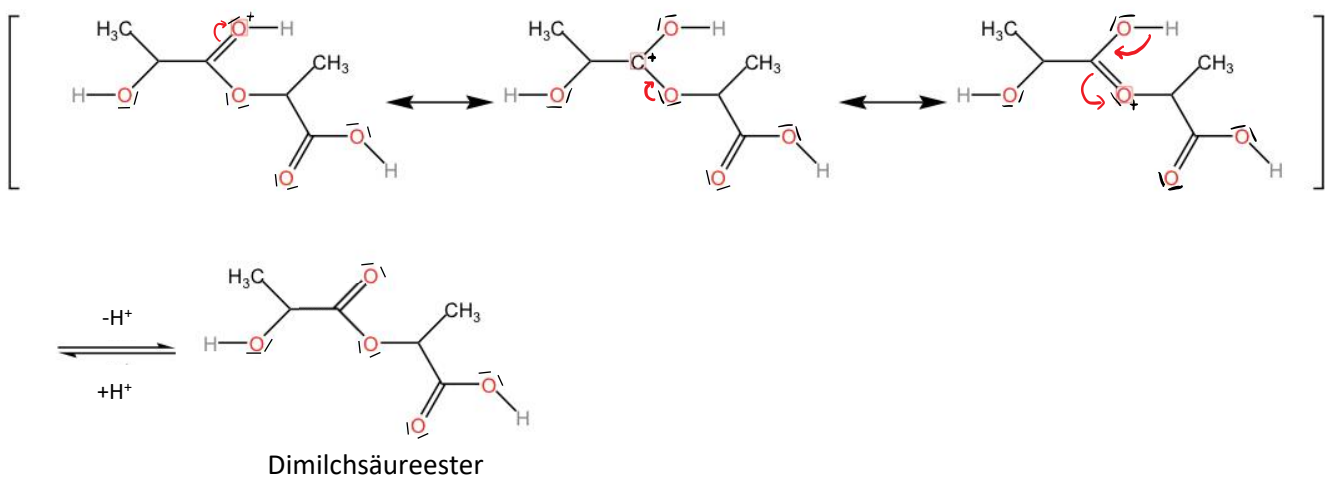
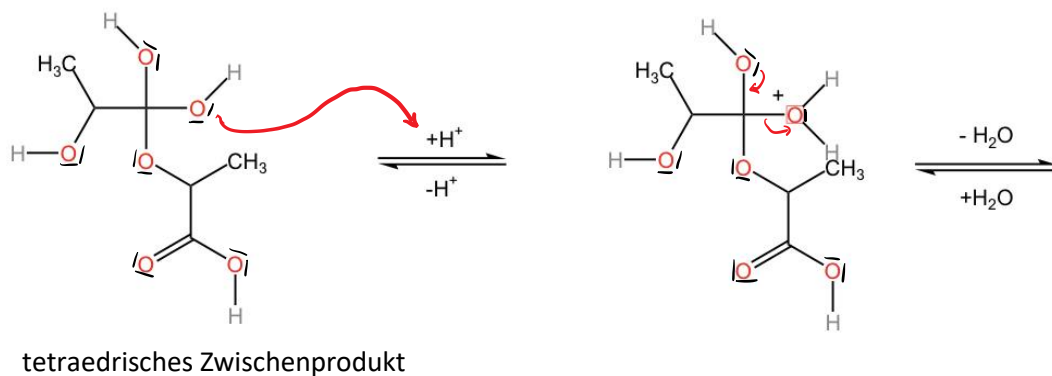
Der **1. Schritt** der Reaktion stellt die Protonierung der Carboxygruppe zu einem Mesomerie-stabilisierten Kation dar.



Im **2. Schritt** wird das gebildete Kation *nukleophil* von einem freien Elektronenpaar der Hydroxygruppe angegriffen. Dadurch bildet sich ein *tetraedrisches* Zwischenprodukt.

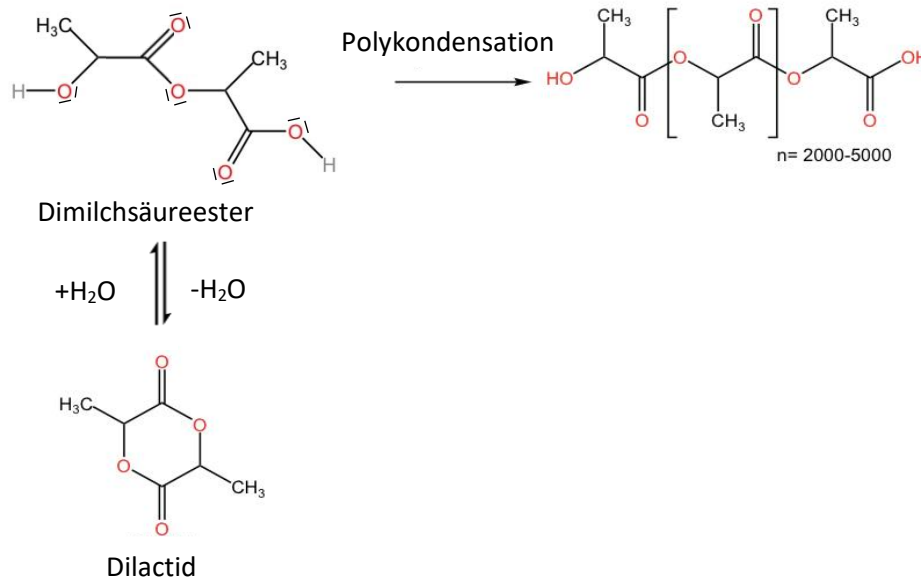


Durch die Protonierung einer der beiden Carboxygruppe des ersten Milchsäuremoleküls, wird im **3. Schritt** durch Wasserabspaltung die Bildung eines Dimilchsäureesters ermöglicht.



Dieser Dimilchsäureester kann auf zwei Arten weiter reagieren. Zum einen können die endständige Hydroxy- und Carboxygruppe weiter zu einem ringförmigen Dilactid reagieren. Diese Reaktion ist erneut eine Veresterungsreaktion. Zum anderen können die endständigen Carboxy- und Hydroxygruppe auch weiter mit den funktionellen Gruppen eines weiteren Milchsäuremoleküls

führen. Analoges Fortschreiten dieser Reaktionsabfolge führt zu *Oligomeren* mit molaren Massen von 2000-5000 g/mol [8]. Die Polykondensation bringt schliesslich längere Ketten hervor.



Diese Oligomere mit den dementsprechenden geringen molaren Massen haben schlechte mechanische Eigenschaften. Um die molare Masse zu erhöhen, kann man mittels eines «*Chain Coupling Agents*» die kurzen Ketten miteinander verknüpfen und so Polymere mit höherem Molekulargewicht synthetisieren. Dies stellt eine direkte Polymerisation dar (siehe Abb. 12).

Ein anderer Weg ist die Ringöffnungspolymerisation. Dabei entstehen durch Polykondensation und anschliessender *zyklisierender Depolymerisation* aus den Oligomeren die Dilactide. Diese Dilactide werden durch eine Ringöffnungspolymerisation und eine *ionische Polymerisation* zu Polymeren mit molaren Massen von über 100'000 g/mol, wie die Abb. 12 zeigt. Als Katalysator und Initiator der Reaktion gelten *Lewis-Säuren* wie zum Beispiel Zinnchlorid [20].

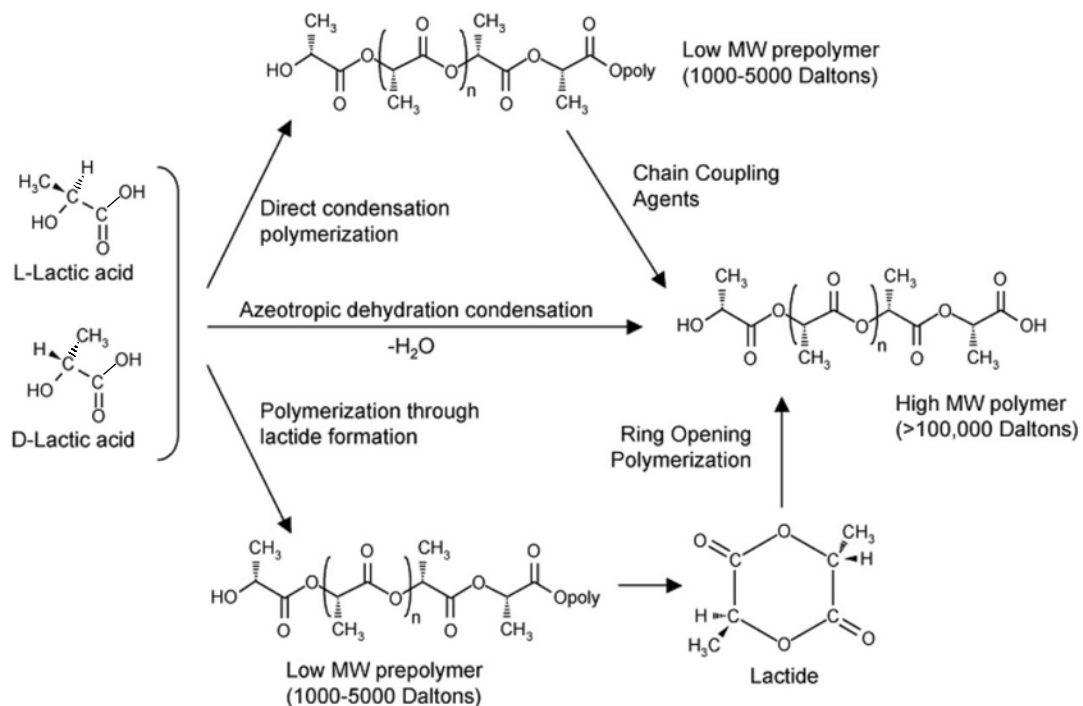


Abb. 12: Polymerisationswege für die Produktion von PLA



## Abbau

Der Abbau von PLA erfolgt grösstenteils durch *autokatalytische* Hydrolyse [21]. Dies bedeutet, dass die entstehenden Milchsäure-Moleküle die Hydrolyse von PLA beschleunigen. Um die Bioabbaubarkeit zu erhöhen, die bei reinem PLA nur über 60 °C erfolgt, werden PLA-Polymere oft mit Stärke zu Copolymeren vermischt [17]. Dazu ist PLA je nach Zusammensetzung schnell bis fast gar nicht biologisch abbaubar. Während PLLA eine Abbaupzeit von mehreren Jahren hat, kann sich PDLLA schon nach wenigen Wochen zersetzen [18]. Dazu können auch Copolymere zu verkürzten Abbaupzeiten führen wie zum Beispiel Glycolid, da sie die kristallinen Strukturen der Homopolymere zerstören [22].

Bei chirurgischen Implantaten von PLA spielen, nachdem das Implantat zu kleinen Fragmenten hydrolysiert wurde, andere Abbaumechanismen wie *Phagozytose* eine grosse Rolle [23]. Dabei werden die Fragmente durch *Phagozyten*, ein wichtiger Bestandteil unseres Immunsystems, mittels Endozytose aufgenommen und in ihre Einzelbestandteile zersetzt.

Dass ein Abbau stattfinden kann, muss zunächst Wasser in das Polymer eindringen und die Estergruppen spalten, damit kleinere *Polymerketten* entstehen (sogenannte Oligomere). Anschliessend werden diese zu ihren ursprünglichen Bestandteilen (Milchsäure) hydrolysiert [23].

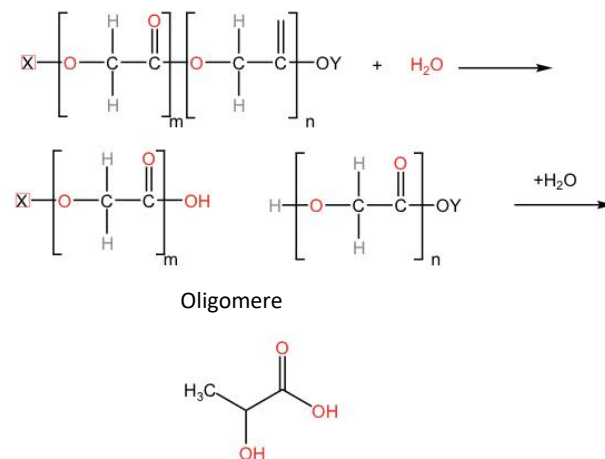


Abb. 13 Fragmentierung von PLA zu Oligomeren (Polymere mit geringer Kettenlänge) und anschliessend zu Monomeren

Da die Bestandteile von PLA bis auf die kleinen Bestandteile nicht wasserlöslich sind, bleibt die äussere Form lange unverändert. Jedoch nimmt das *Molekulargewicht* von Beginn der Wassereinwirkung linear ab [23]. Die Abnahme des Molekulargewichts und der Masse innert 12 Monaten sind in Abb. 14 dargestellt.

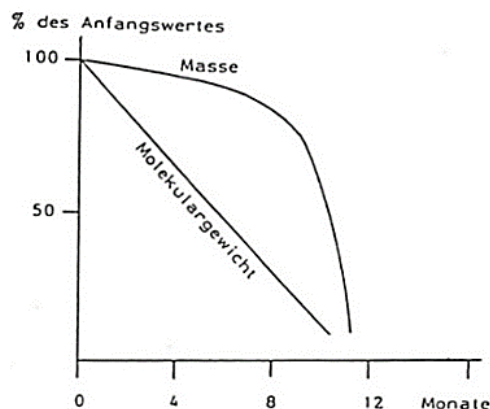


Abb. 14: Abbau von PLA bei 37 °C und pH 7

Wenn PLA gänzlich zu seinen Einzelbestandteilen hydrolysiert wurde, werden die von den Mikroorganismen metabolisiert. Die Abb. 15 stellt die Metabolisierung von Polymeren auf Milchsäurebasis dar. Dies geschieht bei reinem PLA indem es zuerst zu Milchsäure hydrolysiert und anschliessend in den Zytrat-Cyclus eingeschlossen und verstoffwechselt, also zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umgewandelt wird.

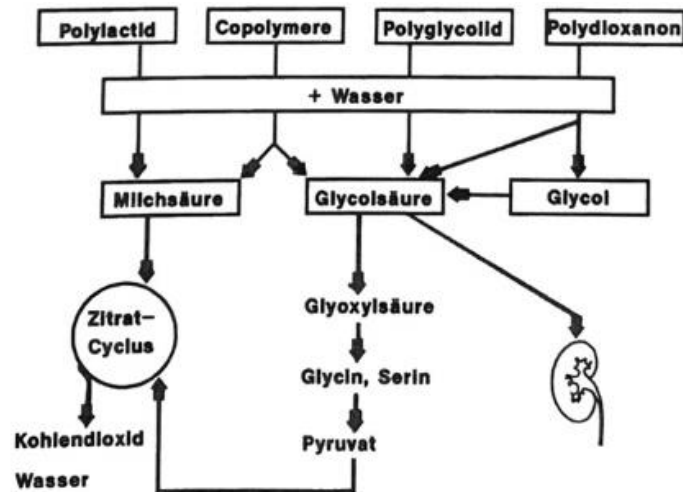


Abb. 15: Metabolisierung von Polymeren auf Milchsäurebasis mit reinem PLA ganz links

## 2.5 Geschichte

Obwohl Biokunststoffe durch Umweltverschmutzung und Knappheit fossiler Rohstoffe zu neuer Aufmerksamkeit gefunden haben, besitzen diese eine längere Geschichte als die heute konventionellen Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen.

Als der erste Kunststoff der Welt gilt *Celluloid*, der 1855 vom Engländer Alexander Parkes erfunden und unter dem Namen Parkesine veröffentlicht wurde [5]. Dazu war dieser Biokunststoff auch der erste Massenkunststoff, welcher industriell hergestellt wurde. Bereits 1869 gründeten die Brüder Hyatt in den USA die erste Fabrik zur Herstellung von Celluloid, ein thermoplastischer Kunststoff aus Cellulose und *Campher*. Der Auslöser für diese Entwicklung war ein Preisausschreiben, bei dem eine kostengünstige Alternative zum kostbaren Elfenbein gefunden werden sollte. Im Rahmen dieses Projekts entwickelte John Wesley Hyatt das Celluloid, welches im Anschluss für Filme, Brillenfassungen, Spielzeug, Kämmen und Tischtennisbälle eingesetzt wurde. Jedoch wurde das Produkt aufgrund seiner schnellen Entflammbarkeit wieder vom Markt verdrängt [24].



Abb. 16: Schildkröt-Puppe aus Celluloid (1950)



Abb. 17: Knöpfe aus Casein (1920)

1897 wurde der Werkstoff *Galalith* aus Casein, einem Protein aus Milch erfunden, der sehr ähnliche Eigenschaften wie Elfenbein hatte. Daraus wurden schlussendlich Knöpfe, Anstecknadeln, Gehäuse für Radios, Zigaretten Dosen, Spielzeuge, Griffe für Regenschirme, aber auch Produkte zu Isolationszwecken für elektrische Anlagen bis in die 1930er-Jahre gefertigt [5]. Durch die hohen Kosten und die Sprödeheit des Materials wurde es jedoch durch petrochemische Konkurrenzprodukte fast vollständig verdrängt [24].

Henry Ford experimentierte in den 1910er-Jahren in den USA mit Weizen und Soja. Die erste Serienanwendung war eine Starterbox, die aus einem Kunstharz aus Weizen-Gluten mit Asbestfaserverstärkung gefertigt war, für das 1915er Ford T-Modell. Anschliessend probierte Ford, verschiedene Produkte auf Soja-Basis umzusetzen. Er nutzte Soja als Grundstoff für Lackierungen, Farben, Gummiersatz und als Glycerin-Ersatz in Stossdämpfern. Dazu wurden auch Soja basierte Produkte für Polsterstoffe verwendet. Aus Sojamehl entstanden Kunststoffe, die mit Hanffasern verstärkt wurden und in immer mehr Autoteilen vorkamen. Schlussendlich fertigte er eine ganze Karosserie aus biobasierten Kunststoffen an, die aus 14 Kunststoffplatten bestand, welche an einem Rohrahmen befestigt waren [25].



Abb. 18: Auto aus Biokunststoff (1941)



Im Jahr 1923 startete die Massenproduktion von *Cellulosehydrat*, welches auch Zellglas genannt wird und unter dem Markennamen „Cellophan“ bekannt ist. Cellophan wurde auf Cellulosebasis entwickelt und wird bis heute für Verpackungen und Briefumschläge genutzt. Primär wurde es für die Herstellung von transparenten Folien eingesetzt, obgleich die Kosten für die Herstellung im Vergleich zu den späteren petrochemischen Konkurrenten sehr hoch waren, wodurch Zellglas in vielen Bereichen verdrängt wurde. Dazu ist Zellglas sehr wasserempfindlich, wodurch es mit *Polyvinylidenchlorid* beschichtet wird und dadurch nicht mehr biologisch abbaubar ist [9].

Abb. 19: Zellglas

Infolge des Erdölbooms verloren Biokunststoffe schnell an Bedeutung und wurden von den fossilen Kunststoffen wie *Plexiglas*, *Nylon*, *Teflon* oder die heutigen Standardkunststoffe wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) vom Markt verdrängt. Ab 1980 und verstärkt nach der Jahrtausendwende wird wieder verstärkt Forschung im Bereich der Biokunststoffe betrieben. Zunächst gewannen Biokunststoffe im Zuge der 1980er-Jahre wegen den neuen Umwelt- und Abfallgesetzen neue Relevanz, wobei besonders auf die Kompostierbarkeit sowie geschlossene Stoffkreisläufe geachtet wurde. Dies führte zu einer neuen Forschung und Entwicklung im Bereich der Biokunststoffe. Das weitere Wachstum der Biokunststoffe ist vor allem auf ein verändertes ökologisches Bewusstsein zurückzuführen, denn durch die steigenden Ölpreise und die Endlichkeit der fossilen Ressourcen wurde eine Ersetzung des Erdöls als Hauptrohstoff unabdinglich. Während die Patentaktivität im Bereich der petrochemischen Kunststoffe immer weiter schwindet, steigt diese im Bereich der Biokunststoffe seit den 1980er-Jahren rasant an. Dies ist ein Indiz für die enorme Forschungsaktivität auf diesem Gebiet [9].

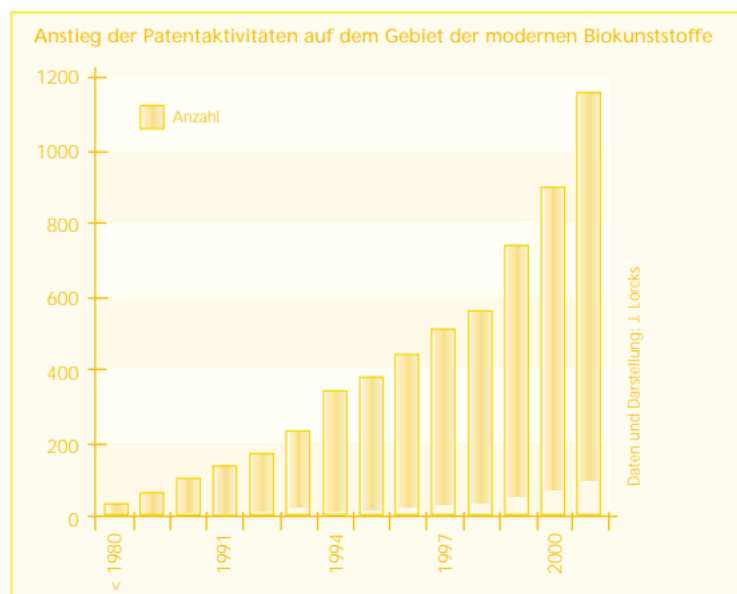


Abb. 20: Anstieg der Patentaktivität auf dem Gebiet der modernen Biokunststoffe

## 3 Einflussfaktoren für den biologischen Abbau

Für einen biologischen Abbau von BAW gibt es einige Einflussfaktoren, welche diesen signifikant beeinflussen. In diesem Kapitel werden chemisch-physikalische, biologische und polymerspezifische Parameter betrachtet, welche einen starken Einfluss auf den mikrobiologischen Abbau von Biokunststoffen haben. Oft sind die einzelnen Parameter stark miteinander verknüpft, sie werden jedoch in dieser Arbeit in "polymerspezifische Eigenschaften" und "Einflussfaktoren in der Kompostierung" unterteilt. Die Einflussfaktoren in der Kompostierung setzen sich zusammen aus den abiotischen (chemisch-physikalischen) Faktoren der unbelebten Natur und den biotischen Faktoren, wozu die Faktoren der belebten Natur und auch die mikrobiologische Aktivität zählen.

### 3.1 Polymerspezifische Eigenschaften

#### 3.1.1 Struktur

Polymerketten, welche ausschliesslich aus Kohlenstoffatomen aufgebaut sind, sind grösstenteils inert gegenüber biologischem Abbau. Es gibt einzelne Ausnahmen wie *Polyvinylalkohol* oder *Naturkautschuk*, welche beide biologisch abbaubar sind. Dies ist jedoch lediglich möglich, da die enzymatische Spaltung der Kohlenstoffhauptkette von Polyvinylalkohol durch eine spezielle *Dehydrogenase* und bei Naturkautschuk durch eine spezifische *Dioxygenase* erfolgt. Alle anderen biologisch abbaubaren Polymere, welche synthetisch oder biologisch hergestellt werden, haben Angriffspunkte für enzymatische Reaktionen wie *Heteroatome* in ihren *Hauptketten*. Meistens sind die Heteroatome in biologisch abbaubaren Polymeren Sauerstoff oder Stickstoff, welche durch ihre Elektronegativität bei den Nachbar-C-Atomen Angriffspunkte darstellen. Dazu ist die Hydrolysierbarkeit des *Rückgrates* auch von den Bindungen in der Polymerkette abhängig. So sind zum Beispiel Esterbindungen schlechter hydrolysierbar als *Amidbindungen*. Somit ist nicht die Herkunft der Polymere ausschlaggebend für den Abbau, sondern lediglich deren Struktur [26].

#### 3.1.2 Schmelzpunkt und Kettenmobilität

Grundsätzlich gilt, dass je tiefer der Schmelzpunkt des Polymers ist, desto schneller wird er abgebaut. Der Schmelzpunkt eines Kunststoffes wird unter anderem durch die Kettenlänge, das Molekulargewicht, durch die Kristallinität wie auch durch Additive beeinflusst [26]. Vernetzte Kunststoffe, welche eine starke *Quervernetzung* aufweisen, sind ebenfalls sehr schlecht oder gar nicht abbaubar. Denn sowohl *Elastomere* als auch *Duroplasten* sind stark vernetzt, wodurch die Kettenmobilität eingeschränkt, das Anlagern von Enzymen erschwert und der biologische Abbau verzögert wird. Deswegen sind die meisten BAW *Thermoplasten*, welche besser abbaubar sind als Elastomere oder Duroplasten. Die Grobstruktur der verschiedenen Kunststoffe sind in Abb. 21 dargestellt.

#### 3.1.3 Kristallinität

Je *kristalliner* ein Polymer, desto länger dauert der Abbau, da es bei kristallinen Polymeren viele intermolekulare Bindungen wie Van-der-Waals Wechselwirkungen gibt. Dies erschwert die Hydrolyse des Polymers, da Wasser schlecht in den Kunststoff eindringen kann. Somit sind amorphe Kunststoffe besser abbaubar als kristalline [26]. Die meisten biologisch abbaubaren Kunststoffe sind *teilkristalline Thermoplaste*. Somit gibt es in diesen Kunststoffen amorphe und kristalline Stellen, wie die Abb. 21 zeigt. Wie schnell ein Kunststoff also abgebaut wird, hängt davon ab, wie viele kristalline und amorphe Stellen dieser besitzt. Dazu wurde ebenfalls bewiesen, dass die amorphen Stellen in einem teilkristallinen Thermoplasten schneller abgebaut werden als die kristallinen. Ein Beispiel dafür, welches bereits im Kapitel PLA-Abbau beleuchtet wurde, sind die

verschiedenen Abbauezeiten vom Copolymer PDLLA und den Homopolymeren PLLA und PDLA. Das Copolymer PDLLA zeigt einen weitaus schnelleren Abbau als die beiden Homopolymere, was auf die nicht vorhandenen kristallinen Strukturen im Copolymer zurückzuführen ist [22].

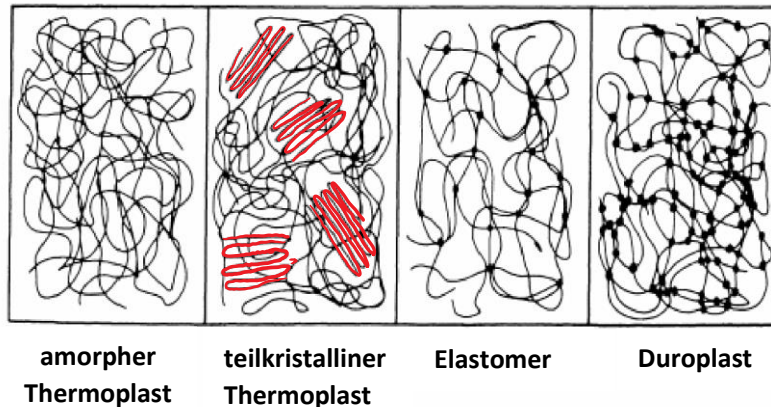


Abb. 21: Verschiedene Arten von Kunststoffen und ihr molekularer Aufbau, mit den kristallinen Stellen im teilkristallinen Thermoplasten (rot eingefärbt)

### 3.1.4 Molekulargewicht

Ein weiterer Faktor ist das Molekulargewicht der Kunststoffe sowie die Länge der Polymere. Je kürzer die Polymere sind und je kleiner ihr Molekulargewicht ist, desto schneller werden sie abgebaut [17]. Denn ein grosses Molekulargewicht lässt auf eine starke Verwicklung schliessen, was das Eindringen von Wasser sowie das Anlagern von Enzymen und somit die Hydrolyse des Polymers erschwert [22]. Die Kettenlänge und das Molekulargewicht sind stark korreliert, denn die Kettenlänge gibt an, wie viele Monomere sich durchschnittlich in einer Kette befinden und das Molekulargewicht ist die Masse einer Polymerkette. Es wird immer vom mittleren Molekulargewicht gesprochen, da nicht alle Polymerketten gleich lang sind und somit kein absolutes Molekulargewicht existiert.

### 3.1.5 Oberfläche

Da sich an der Oberfläche der Kunststoffe Enzyme anlagern können müssen, ist es wichtig, dass die Polymere eine möglichst grosse Oberfläche haben. So kann auch das Wasser überall den Stoff hydrolysieren. Eine Anlagerung von Enzymen wird vor allem durch eine raue, unebene und hydrophobe Oberfläche begünstigt. Dazu werden kleine und dünne Fragmente am besten abgebaut, während grössere Formen mehrere Jahre brauchen [17].

### 3.1.6 Wasserlöslichkeit

Die Mikroorganismen absorbieren die wasserlöslichen Bestandteile durch ihre Zellmembran, wo sie schlussendlich zu Kohlenstoffdioxid und Wasser umgesetzt werden. Damit die Mikroorganismen jedoch die Oligomere oder die Monomere aufnehmen können, müssen diese wasserlöslich sein. Somit ist die Wasserlöslichkeit der kleineren Bestandteile eines Polymers unabdingbar, da ansonsten ausschliesslich eine Fragmentierung, nicht aber ein biologischer Abbau stattfindet [17].

### 3.1.7 Photo-bioabbaubar

Polymere, welche Photo-bioabbaubar sind, zerfallen in zwei Teilschritten, zuerst findet eine *Photodegradation* und anschliessend der vollständige Abbau durch Bioabbau statt. Um die Photodegradation zu beschleunigen, können gewollte Schwachstellen wie *Carbonylgruppen*, lichtempfindliche Additive oder Copolymere zugegeben werden. Durch eine Bestrahlung mit UV-Licht werden

dadurch intra- und intermolekulare Bindungen geschwächt und gebrochen, wodurch das Polymer brüchig wird. Anschliessend findet der Abbau durch *Bioerosion* oder Bioabbau statt, wobei ständig Bindungen gebrochen werden und so das Molekulargewicht latent abnimmt [17]. Es kann auch ein Primärabbau durch Zugabe von *Oxidantien* stattfinden, wodurch Bindungen durch *radikalische Reaktionen* gespalten werden, was somit zur Bildung von Oligomeren führt, welche anschliessend metabolisiert werden können [26].

## 3.2 Einflussfaktoren in der Kompostierung

Die Kompostierung (auch Rotte) ist ein aerober Vorgang, bei dem Kohlenstoffverbindungen durch aerobe Bakterien und Pilze gebrochen und zu Biomasse, Kohlendioxid sowie Wasser umgesetzt werden [27]. Es gibt dabei abiotische und biotische Faktoren, welche die Rotteintensität signifikant beeinflussen.

## 3.3 Abiotische Faktoren

### 3.3.1 pH Wert

Der pH-Wert sollte in dem für Mikroorganismen optimalen Bereich zwischen 7.0 und 8.0 liegen. Von BIDLINGMAIER (1984) konnte nachgewiesen werden, dass die höchste Rotteintensität im leicht alkalischen Bereich stattfindet [28]. Während der Kompostierung verändert sich der pH-Wert, wie die Abb. 22 illustriert, da die Produktion von organischen Säuren als Zwischenprodukte durch den Abbau von komplexen kohlenstoffhaltigen Materialien den pH-Wert zu Beginn der Kompostierung senkt [29]. Diese Senkung durch Bildung von Säuren führt zu einem verstärkten Abbau von Lignin und Cellulose sowie einem erhöhten Pilzwachstum [30]. Der pH-Wert wird zusätzlich durch die Bildung von CO<sub>2</sub> und durch die Nitrifikation gesenkt. Im weiteren Verlauf steigt der pH-Wert wieder auf über 7 an, da Aufbauprozesse organische Säuren komplett *mineralisieren* [31, 29]. Um ungewünschte Versauerung des Komposts zu vermeiden, sollte man saure Bioabfälle wie Zitronenschalen oder Orangenschalen vermeiden [32].

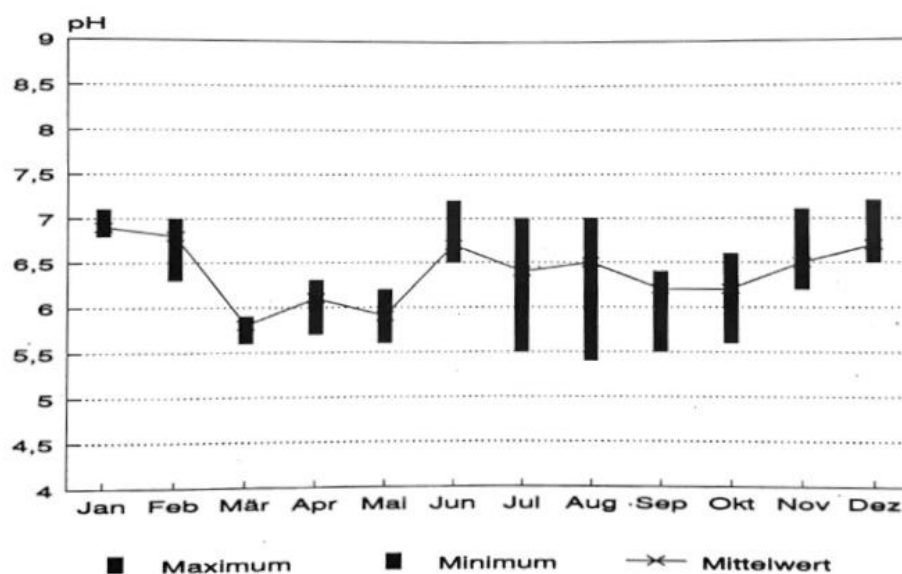


Abb. 22: Jährliche Schwankung des pH-Wertes im Bioabfall von Witzenhausen [34]

### 3.3.2 Feuchtigkeit

Der Wassergehalt sollte zwischen 55 % und 65 % liegen, denn bei einem zu tiefen Wassergehalt (<25 %) ist der Rotteprozess nicht mehr funktionsfähig. Dies ist der Fall, da Bakterien Nährstoffe nur in gelöster Form über ihre Zellmembran aufnehmen können. Bei einem zu hohen Wassergehalt, wird der Boden zu stark verdichtet und die Sauerstoffverfügung ist nicht mehr ausreichend, was zu Fäulnisbildung führt [33].

### 3.3.3 C/N-Verhältnis

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Kompostierung ist das Kohlenstoff zu Stickstoff Verhältnis. Denn das C/N-Verhältnis steht in starker Korrelation zu der Mikroorganismenaktivität im Boden oder im Kompost. Denn die Nährstoffversorgung der Mikroorganismen muss durch ausreichend Stickstoff gesichert sein. Die anderen Nährstoffe wie Phosphor, Schwefel, Kalium, Calcium und Magnesium sind im Boden ausreichend vorhanden, Stickstoff allerdings nicht [34]. Von GLATHE (1985) konnte nachgewiesen werden, dass der optimale Abbau bei einem C/N-Verhältnis von 20:1 bis 35:1 erfolgt. Ein hohes C/N-Verhältnis lässt auf schwer abbaubares Material schließen und verzögert den Abbauprozess, während ein zu enges Verhältnis zu Stickstoffverlust führt. Denn wenn zu viel Stickstoff vorhanden ist, kann dieser nicht vollständig in die Biomasse eingebaut werden und entweicht in gasförmiger Form als Ammoniak [35]. Ammoniak ist gesundheitsschädlich und führt zu einer Senkung des pH-Wertes im Boden [36]. Küchenabfälle haben durchschnittlich ein relativ enges C/N-Verhältnis von 12:1 bis 20:1 und können durch Strukturmaterial wie Sägemehl (100-500:1) korrigiert werden [37]. Falls das C/N-Verhältnis zu hoch ist, kann dieses durch frische Gartenabfälle (7:1), Rasenschnitt (10:1) oder Harnstoff ausgeglichen werden.

### 3.3.4 Porenvolumen

Die Struktur des Komposts ist ebenfalls essentiell für die Sauerstoffversorgung des Rotteguts [34]. Als quantitatives Mass für „Struktur“ gilt das *Porenvolumen*. Dieses beschreibt die Hohlräume, welche ein Boden hat, in welche Sauerstoff und/oder Wasser eindringen können [38]. Das Porenvolumen lässt sich in *Primärporen* und *Sekundärporen* aufteilen. Primärporen sind körnungsbedingte Poren, also Poren, welche zwischen den Einzelkörnern auftreten [39]. Die Sekundärporen hingegen sind Poren, welche durch mechanisch Vorgänge wie Frostaufbruch entstehen und biologischen Vorgängen wie Regenwurmängen [40]. Dieses Porenvolumen sollte optimalerweise zwischen 25 % und 35 % liegen, denn ein zu geringes Porenvolumen verhindert eine ausreichende Sauerstoffversorgung für die Mikroorganismen im Kompost. Ein zu hohes Porenvolumen ist gekennzeichnet durch zu geringes Wasserhaltevermögen und geringe Nährstoffversorgung [41]. Um dieses Porenvolumen zu optimieren und einen zu dichten Komposthaufen zu vermeiden, nutzt man Strukturstoffe, welche die nötigen Luftlöcher schaffen sollen. Als Strukturstoffe gelten Holzzweige, Stroh, Holzspäne und Holzäste [32]. Diese Stoffe sollten auch nach der intensiven Heissrottephase noch beständig sein [34]. Die Primärporen werden durch diese Strukturstoffe beeinflusst, während man Sekundärporen durch einen offenen Bodenzugang optimieren kann, da so Regenwürmer und andere Bodenlebewesen Gänge graben können, welche ebenfalls Lufträume kreieren.

### 3.3.5 Temperatur

Dadurch, dass die Mikroorganismen nur rund 1/5 des umsetzbaren Kohlenstoffs zum Aufbau von Biomasse umsetzen, wird der Rest für den Betriebsstoffwechsel verwendet. Die dabei entstehende Wärme wird freigesetzt. Dies führt zu der charakteristischen Selbsterwärmung des Komposts. Am Anfang erwärmt sich der Kompost von 25 °C bis auf 45 °C, dies ist die erste *mesophile* Phase. Dabei werden vor allem leicht zersetzbare Stoffe gespalten wie Kohlenhydrate, Glycerin



und Proteine. Anschliessend steigen während der Heissrottephase die Temperaturen auf 45-70 °C. Dabei findet eine *Hygienisierung* des Rotteguts statt, also eine Abtötung der *pathogenen* Keime [42]. Während dieser Zeit findet ein intensiver Abbau der organischen Substanzen statt und wird deshalb auch Abbauphase genannt. Je nach Art und Menge der Substrate, der Aussentemperatur und der Sauerstoffversorgung kann die Heissrottephase einige Tage bis mehrere Wochen andauern [34]. Die Temperatur sollte dabei nicht den Wert von 70 °C überschreiten, da dies ein Abtöten der Mikroorganismen zur Folge haben kann, welches wiederum den weiteren Rottevorgang verlangsamt [31]. Nach der initialen Heissrottephase sinkt die Temperatur wieder in den mesophilen Bereich (25-45 °C), diese Phase nennt man auch Umbauphase oder die zweite mesophile Phase. Denn die leicht abbaubaren Stoffe sind nun abgebaut und es sind nur noch die schwer abbaubaren Bestandteile wie Lignin übrig [43]. Anschliessend erreicht der Kompost die Aussentemperatur und passt sich seiner Umgebungstemperatur an. Es werden vermehrt Humusverbindungen durch die *Humifizierung* aufgebaut, wodurch der Übergang zu der Aufbauphase einleitet wird. Ein typischer Temperaturverlauf mit den drei Phasen wird in der Abb. 23 dargestellt.

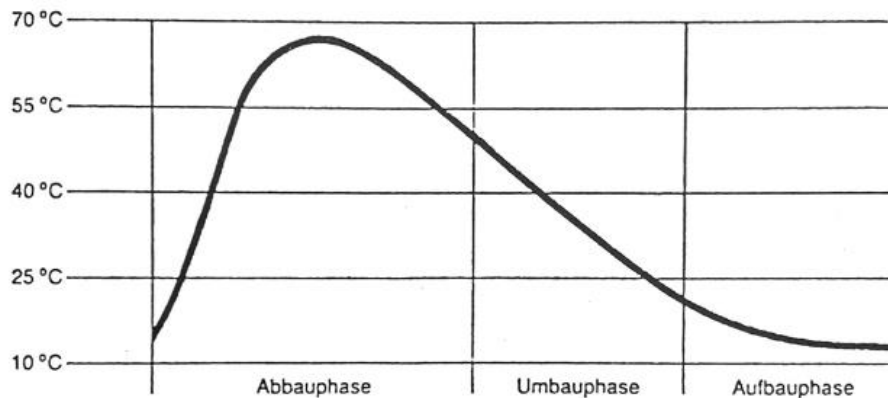


Abb. 23: Typischer Temperaturverlauf einer Kompostmiete

### 3.3.6 Standort und Lichtverhältnisse

Es konnte nachgewiesen werden, dass ein verstärkter Abbau im Halbschatten stattfindet. Denn ein Platz an der prallen Sonne führt zu erhöhter Verdunstung des Wassers im Kompost, was zu Trockenheit im Kompost führt. Eine Position gänzlich im Schatten führt dagegen zu hoher Feuchtigkeit, wodurch der Kompost Gefahr läuft zu durchnässen. Der Standort sollte auch nicht windstill sein, sondern einen guten Luftzug haben, sodass genügend Sauerstoff den Kompost erreicht. Analog sollte der Kompost auch Bodenkontakt haben, da so Regenwürmer und andere Bodenlebewesen den Kompostierungsprozess beschleunigen können. Ein Bodenkontakt führt auch dazu, dass das Wasser absickern kann und so einer Durchnässung des Komposts vorbeugt. Um Wühlmäuse zu vermeiden, sollte man den Kompost auf ein Gitter stellen, sodass kleine Bodenlebewesen dieses noch penetrieren können, grössere jedoch nicht [44].

## 3.4 Biotische Faktoren

### 3.4.1 Mikroorganismen

Für den biologischen Abbau von BAW müssen zunächst passende Mikroorganismen vorhanden sein, da gewisse Mikroorganismen nur eine spezifische Gruppe von Polymeren abbauen können. Die Mikroorganismen-Diversität korreliert stark mit den Einflussfaktoren der Kompostierung wie

pH-Wert, C/N-Verhältnis oder Sauerstoffverfügbarkeit. Diese Mikroorganismen variieren je nach Abbaumedium. So sind Pilze, welche feste Oberflächen bevorzugen, im Kompost ein wichtiger Bestandteil, während sie in wässrigem Medium kaum vertreten sind. Mikroorganismen müssen fähig sein, *extrazelluläre Enzyme* auszuschleiden, da die Makromoleküle aufgrund ihrer Molekülgröße die Zellmembran der Mikroorganismen nicht passieren können. Um diese Moleküle trotzdem als Substrate verwenden zu können, müssen sie extrazelluläre Enzyme produzieren, welche an der Kunststoffoberfläche adsorbiert werden und die Polymerketten in wasserlösliche Fragmente spalten. Somit ist der biologische Abbau ein Oberflächenprozess, bei dem sukzessive Material an der Oberfläche abgetragen wird. Wenn die Polymere zu wasserlöslichen Bestandteilen gespalten worden sind, werden sie im Medium gelöst und von den Mikroorganismen aufgenommen und zu  $H_2O$ ,  $CO_2$  und anderen natürlichen Produkten metabolisiert. Der enzymatische Abbau und die Metabolisierung durch Mikroorganismen ist in der Abb. 24 zusätzlich illustriert. Diese anfängliche enzymatische Kettenspaltung ist oftmals der abbaugeschwindigkeitsbestimmende Schritt [26]. Dazu ist eine hohe Mikroorganismen-Aktivität und Artenvielfalt essenziell für die Selbsterwärmung und somit dem Temperaturverlauf des Komposts [45].

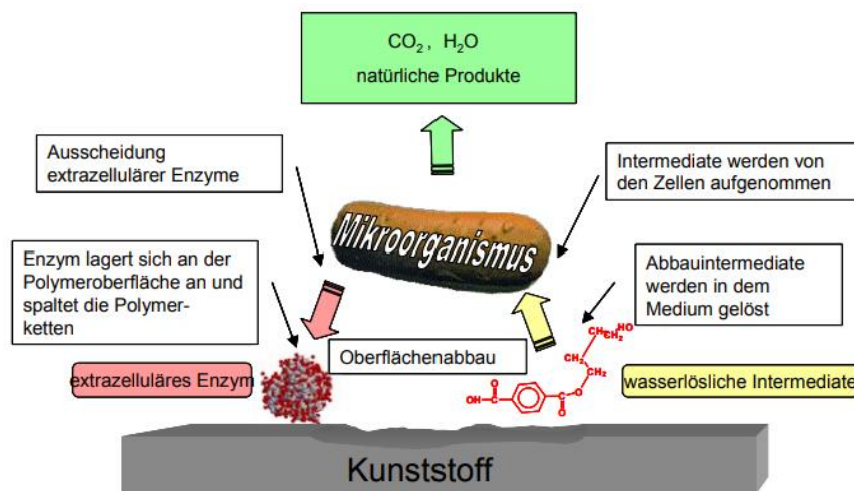


Abb. 24: Schematische Darstellung vom mikrobiellen Abbau von Polymeren

### Mikroorganismen während der Kompostierung

Die Mikroorganismenaktivität sowie die Arten, welche an der Kompostierung teilnehmen, variieren stark, je nachdem in welcher Phase der Kompostierung der Kompost sich befindet, wie die Abb. 25 zeigt.

In der mesophilen Phase (25-45 °C) werden leicht abbaubare Substrate durch Pilze, *Actinobacteria* und Bakterien, welche auch als erste primäre Zersetzer gelten, abgebaut.

Nachdem die Temperaturen in einen Bereich von 35- 65 °C angestiegen sind, wird die mesophile Fauna fast gänzlich durch *thermophile* Mikroorganismen ersetzt. Die mesophilen Mikroorganismen, welche durch die erhöhten Temperaturen absterben, werden von den thermophilen Mikroorganismen mit den restlichen Substraten abgebaut. Thermophile Pilze können optimal zwischen 35-55 °C wachsen, während höhere Temperaturen die Bildung von thermophilen Pilzen signifikant einschränken. Thermoresistente respektive thermophile Bakterien und Actinobacteria können auch bei Temperaturen über 55 °C noch überleben, wobei bei Temperaturen über 65 °C eine Abtötung der meisten Mikroorganismen stattfindet.

Wenn anschliessend die Temperaturen aufgrund von einer Knappheit an Substraten wieder sinken, wird der Kompost erneut von mesophilen Bakterien und Pilzen besiedelt. Diese mesophilen Mikroorganismen können durch *Sporenbildung* die thermophile Phase überleben oder von aussen den Kompost kolonisieren [45].

In der Aufbauphase steigt die Anzahl an Pilzen, während die Zahl an Bakterien ständig abnimmt. Allgemein nimmt die Mikroorganismenaktivität mit fortlaufender Zeit beträchtlich ab, wie die Abb. 25 zeigt.

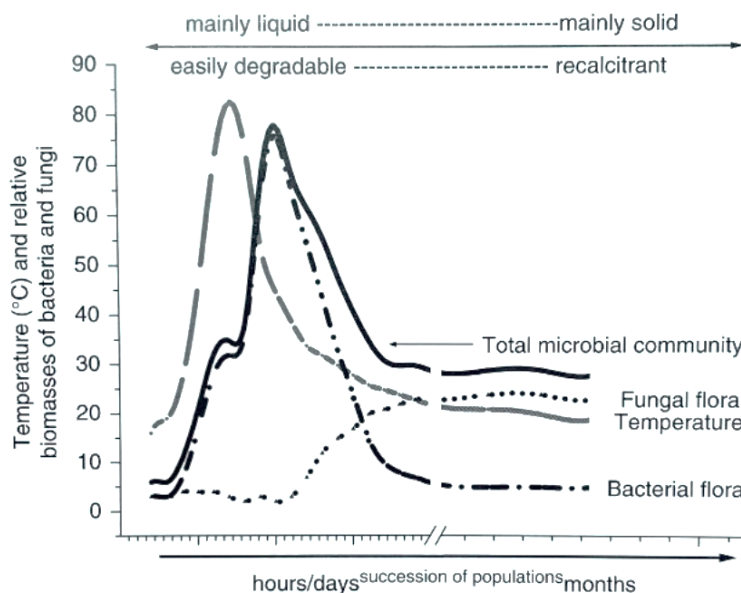


Abb. 25: Darstellung der Bakterien- und Pilzflora sowie der gesamten Mikroorganismen-Kultur in Relation zur Temperatur

## Bakterien

Bakterien sind einzellige Mikroorganismen, welche keinen Zellkern besitzen und somit zu den Prokaryoten zählen. Sie bilden eine der drei Domänen der Lebewesen [46]. In der Kompostierung sind Bakterien eine der wichtigsten Mikroorganismen und in mariner Umgebung erfolgt der Abbau fast ausschliesslich durch Bakterien [17]. Bei Temperaturen unter 60 °C werden rund 40 % der gesamten Abfälle im Kompost infolge der Bakterienaktivität abgebaut. Temperaturen zwischen 50-65 °C sind für Bakterien optimal, vor allem für den *Genus Bacillus*. In diesem Bereich ist die Diversität der Bacilli sehr hoch, während sie bei Temperaturen über 60 °C drastisch sinkt [29]. Wenn die Temperaturen 65 °C überschreitet, ist *B. stearotherophilus* der dominanteste Bakterientypus. Er ist tatsächlich so dominant, dass er mit einer puren Population dieser Art vergleichbar ist. Zusätzlich sind auch anaerobe Bakterien am Kompostierungsprozess beteiligt, jedoch ist nur wenig über die einzelnen Arten und ihr genaues Vorkommen bekannt [45].

## Actinobacteria

Actinobacteria sind eine der artenreichsten Stämme unter den Bakterien. Sie sind stäbchenförmig und können Sporen bilden. Sie werden auch Strahlenpilze genannt, da sie ein *Myzel* ausbilden können, welches aus einer Vielzahl von *Hyphen* besteht. Die Hauptaufgabe des Myzels ist die Absorption von Nährstoffen für den Wachstum der Actinobacteria [47]. Sie präferieren einen neutralen oder leicht alkalischen pH-Wert. Dazu sind sie in der Lage, komplexe Substrate abzubauen. Die meisten Actinobacteria sind *thermotolerant* oder gar *thermophil*. Die optimale Temperatur

für Actinobacteria-Kulturen liegt zwischen 50 °C und 60 °C. Sie können den Kompost besonders gut bevölkern, wenn die Substrate nass sind und es genug Sauerstoff zur Verfügung hat. Diese Konditionen liegen meistens vor, wenn die leicht abbaubaren Substrate bereits kompostiert wurden und eine Temperatur von 45 °C überschritten worden ist. Sie sind jedoch auch in den späteren Phasen der Kompostierung essenziell [45]. Diese starke Besiedlung ist auch erkennbar durch die weissen Fäden aus Myzelium im Kompost, die in Abb. 26 zu sehen sind [29].

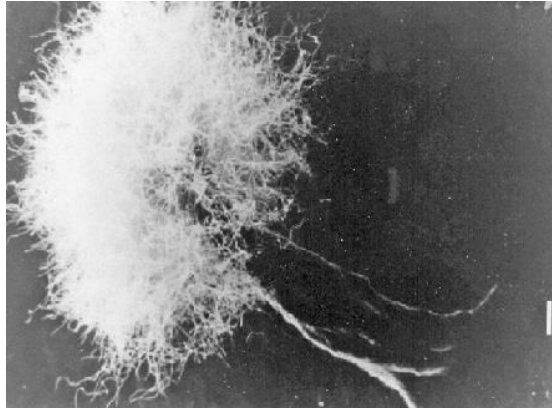


Abb. 26: Darstellung von den Actinosynnema ausgebildeten Hyphen

### Thermus/Deinococcus Gruppe

Bakterien der *Thermus/Deinococcus Gruppe* sind vor allem dominant im Temperaturbereich von 40 bis 80 °C. Sie wachsen auf organischen Substraten und spielen eine essenzielle Rolle in der Heissrottephase. Des Weiteren konnten auch autotrophe Bakterien im Kompost isoliert werden, welche im Temperaturbereich von 60-80 °C wachsen und ihre Energie durch die Oxidation von Schwefel oder Wasserstoff gewinnen [45].

### Archaea

*Archaea* sind Lebewesen, welche keinen Zellkern besitzen und so zu den Prokaryoten zählen. Sie zählen zu den *Extremophilen* und bilden die 3. Domäne der Lebewesen neben den Bakterien und den Eukaryoten, zu denen sowohl Tiere als auch Pflanzen zählen. Im Vergleich zu den Bakterien besitzen Archaea andere Zellkomponenten und Moleküle [48]. Im Kompost sind erst einige Male Archaea isoliert worden, jedoch spielen sie in der thermophilen Phase eine entscheidende Rolle [45].

### Pilze

Pilze sind heterotrophe Lebewesen und gehören zu der Gruppe der Eukaryoten. Um ihre Nahrung aufzunehmen, scheiden sie extrazelluläre Enzyme aus und die im Wasser gelösten Stoffe werden anschliessend absorbiert [49]. Im Kompost sind sie ein wichtiger Bestandteil für den Abbau von Substraten. In der Anfangsphase konkurrieren die Pilze mit den Bakterien um die leicht abbaubaren Substrate. Da Bakterien jedoch ein schnelleres Wachstum haben und für Pilze eine gute Sauerstoffversorgung wichtig ist, werden sie durch die Bakterien verdrängt. Dazu sind Pilze auch weniger hitzebeständig, wodurch sie in der thermophilen Phase der Kompostierung eine vernachlässigbare Rolle spielen. Allerdings sind Pilze unabdingbar für den Abbau von Substraten, die reich an Cellulose oder Lignin sind. Deren Abbau erfolgt fast ausschliesslich durch Pilze. Wenn gegen Ende der Kompostierung der Wassergehalt abnimmt, nimmt die Pilzpopulation wieder zu, da dies ein Vorteil für ihr Wachstum ist [45].

### 3.4.2 Organismen

Es sind nicht nur Mikroorganismen am Kompostierungsprozess beteiligt, sondern auch einige grössere Organismen, welche den Kompostierungsprozess gezielt beeinflussen. Sofern der Kompost in der mesophilen Phase (25-40 °C) nicht gross umgeschichtet wird, entwickeln sich vor allem Kompostwürmer, Milben und Tausendfüßlern, welche als Katalysatoren agieren und stabilen Dauerhumus aufbauen [45].

#### Regenwürmer

Der Regenwurm hat einen signifikanten Einfluss auf den Kompostierungsprozess. Er vermischt, lockert und perforiert die *Kompostmiete*, wodurch der Kompostierungsprozess beschleunigt wird.

Dadurch, dass der Regenwurm durch sein ständiges Graben Kanäle und Poren kreierte, lockert er sowohl die Erde auf und belüftet sie zugleich. Die Gänge führen zusätzlich auch zu einer besseren Wasserversorgung des Komposts, da sich das Wasser durch die Gänge besser verteilen und auch in die unteren Schichten dringen kann. Dadurch kann der Kompost auch mehr Wasser speichern.



Abb. 27: Schematische Darstellung von Regenwurmgehängen im Boden

Der Kot des Regenwurms stellt ebenfalls eine wichtige Bereicherung für den Kompost dar. Denn der Kot des Regenwurms ist äusserst nährstoffhaltig und dadurch eine wichtige Nährstoffquelle für Mikroorganismen wie auch für andere Bodenlebewesen. Der Kot des Regenwurms ist so nährstoffreich, da er sich hauptsächlich von Pflanzenresten, tierischen Fäkalien und Verwesungsrückständen ernährt. Optisch ist der Regenwurmkot der Erde sehr ähnlich, er enthält jedoch bedeutend mehr Wasser, Nährstoffe und hat ausserdem einen höheren pH-Wert. Zusätzlich kann der darin enthaltene Schleim den Mikroorganismen ebenfalls als Nahrungsquelle dienen.

Ein weiterer Vorteil, den der Regenwurm mit sich bringt, ist, dass er die verschiedenen Kompostschichten durchmischt und so zu einer homogenen Verteilung des Rotteguts verhilft [50].

## 4 Material und Methode

Um die Fragestellung, ob biologisch abbaubare Werkstoffe wirklich biologisch abbaubar sind, zu beantworten, wurde ein empirischer Versuch durchgeführt.

Die Kompostierung wurde vom 11.06.2022 bis zum 03.09.2022, also während 3 Monaten durchgeführt. Für den Versuch wurde ein Thermokomposter benutzt, welcher durch eine Doppelwand isoliert war und ein Füllvolumen von 250 l hatte, wie die Abb. 28 zeigt. Er wurde an einem Platz im Halbschatten positioniert und auf ein Gitter mit einer Maschengrösse von 2 cm gestellt. Dazu wurde eine Dränage (siehe Anhang S. 59) aus etwas grösseren Ästen angefertigt, sodass genügend Sauerstoff in den Kompost diffundieren konnte und das exzessive Wasser ablaufen konnte, um eine Durchnässung des Komposts zu verhindern (für detaillierte Bilder des Versuches siehe Anhang S. 59).

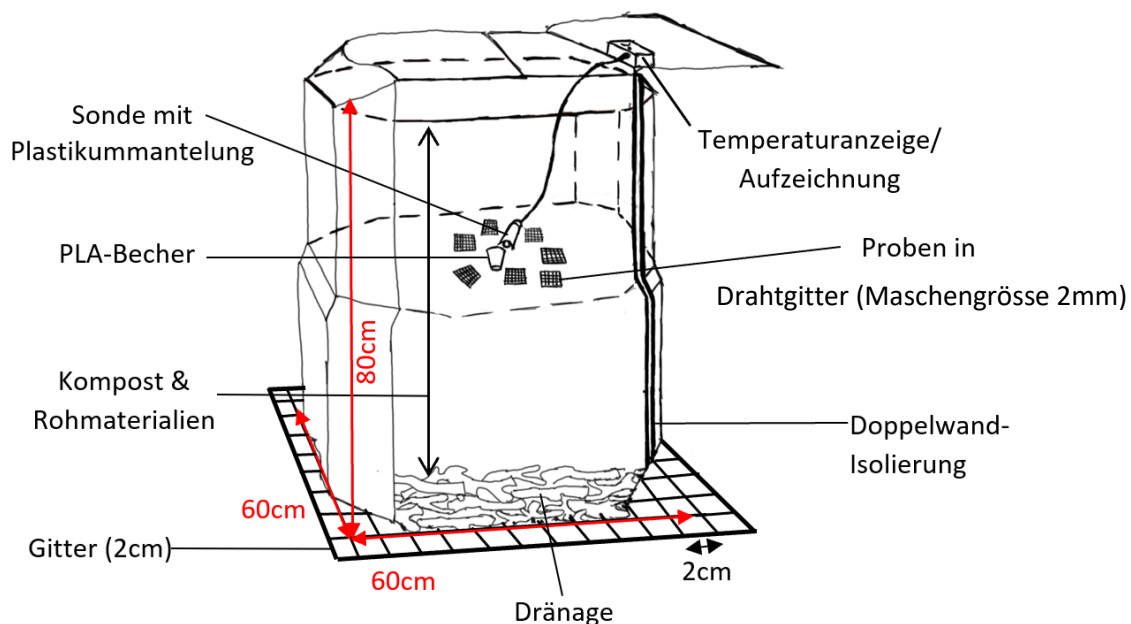


Abb. 28: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Der Kompost wurde durch 92 kg Kompost mit Mikroorganismen beimpft und es wurden 27.25 kg Rohmaterialien hinzugefügt, um die Mikroorganismenaktivität zu fördern. Die Rohmaterialien waren ausgeglichen mit grünem und braunem Material, um ein möglichst optimales C/N-Verhältnis zu erreichen. Dazu wurden auch Sägemehl und kleine Äste und Zweige hinzugefügt, um das Porenvolumen zu vergrössern und so die Sauerstoffversorgung des Rotteguts zu optimieren. Alle Materialien, die Mengen davon und das respektive C/N-Verhältnis sind in der Tabelle 2 aufgelistet. Dadurch kann man die gesamte Menge an Rohmaterialien ermitteln sowie das durchschnittliche C/N-Verhältnis (Formel auf der nächsten Seite), wobei das C/N-Verhältnis vom Kompost selbst etwa 10/1 beträgt. In den Wochen 1, 2, 3, 5, 7, 10 wurde der Kompost mit neuen Rohmaterialien befüllt, welche aus 4 kg Heckenschnitt, 100 g Sägemehl und 2 kg frischer Küchenabfälle, 500 g Stroh und 2.5 kg Rasenschnitt bestand (siehe Anhang S. 60). Alle Rohmaterialien wurden in 3 cm grosse Stücke zerkleinert, um die Oberfläche zu vergrössern und so den Kompostierungsprozess zu beschleunigen. Indem man den Durchschnitt zwischen dem alten Rohmaterial und dem neuen ausrechnet, kann man den Verlauf des C/N-Verhältnisses ausrechnen.

$$C/N_{ins} = \frac{\sum_{k=1}^n \epsilon_k * m_k}{m_{ges}}$$

$C/N_{ins}$  = Gesamtes C/N – Verhältnis

$m_k$  = Masse des Substrates

$\epsilon_k$  = C/N – Verhältnis des Substrates

$m_{ges}$  = Gesamtmenge der Substrate

| Materialien                           | Menge Rohmaterial |               | C/N-Verhältnis |             |
|---------------------------------------|-------------------|---------------|----------------|-------------|
|                                       |                   | neu           | neu            |             |
| Küchenabfälle                         | 5.5 kg            | 2 kg          | 20/1           |             |
| Stroh                                 | 3.0 kg            | 0.5 kg        | 80/1           |             |
| Rasenschnitt                          | 3.0 kg            | 2.5 kg        | 10/1           |             |
| Frischer Heckenschnitt                | 12.0 kg           | 4 kg          | 7/1            |             |
| Getrocknete Blätter                   | 3.0 kg            |               | 50/1           |             |
| Sägemehl/ Holzschnitzel               | 0.25 kg           | 0.1 kg        | 500/1          |             |
| Kleine Zweige/ Äste                   | 0.5 kg            |               | 100/1          |             |
| <b>Rohmaterialien<br/>(insgesamt)</b> | <b>27.25 kg</b>   | <b>9.1 kg</b> | <b>29/1</b>    | <b>20/1</b> |

Tabelle 2: C/N-Verhältnis der Rohmaterialien und den neuen Rohmaterialien

Der pH-Wert des Komposts wurde in der Woche 1 mittels einer Glaselektrode und in den Wochen 2, 5, 7, 10, 12 mittels pH-Messstab ermittelt (siehe Anhang S. 60). Dafür wurde eine Probe von 12 g aus dem Kompost genommen und mit 25 ml entionisiertem Wasser vermischt, sodass eine homogene Lösung entstand. Anschliessend wurde der pH-Wert gemessen. Dafür wurde der pH-Messstab vollständig in die Lösung eingetaucht und anschliessend die Farben mit der Skala verglichen. Die Temperatur des Komposts wurde alle 15 Minuten mittels einer Sonde überprüft. Die Sonde wurde mit einem rPET Plastik ummantelt, da diese nicht Nass werden durfte (siehe Anhang S. 59). Dazu wurden Aussentemperatur und Luftfeuchtigkeit jeden Abend um 20:00 im Laufe der gesamten Versuchsdauer notiert. Der Wassergehalt wurde am Anfang des Versuches auf 55 Gewichts % eingestellt und danach durch optische Analyse auf Trockenheit überprüft. Zusätzlich wurde der Kompost täglich optisch analysiert und auf Organismen sowie Anzeichen von Mikroorganismen (Myzel etc.) untersucht.

Es wurden 7 Proben in einem Drahtgitter aus Edelstahl mit Maschengrösse 2 mm eingepackt (siehe Anhang ab S. 61). Die Materialien PLA, ecovio® und Mater-Bi wurden überprüft und alle Informationen zu den Herstellern, Normen und den Produkten sind in der Tabelle 3 aufgelistet. Als Positivprobe für den ecovio®- und Mater-Bi-Beutel galt Papier und ein konventioneller Abfallbeutel aus PE diente als Negativprobe für den Versuch. Für den PLA-Plastikbecher wurde ein Stück Baumwolle als Positivprobe genutzt aufgrund der ähnlichen Dicke und Dichte der Materialien und als Negativprobe galt eine herkömmliche rPET-Flasche. Alle Proben hatten eine Grösse von 5 cm x 7 cm, sodass die Oberfläche und damit auch die Angriffsfläche des Abbaus bei allen Proben äquivalent war. Anschliessend wurden sie in der Mitte des Thermokomposts positioniert (siehe Anhang S. 59) und gänzlich mit der Kompost-Rohmaterial-Mischung bedeckt. Dazu wurde noch ein ganzer PLA- Plastikbecher inmitten der 7 Proben platziert. Um die verschiedenen Proben unterscheiden zu können, wurde um gewisse Drahtgitter zusätzlich ein oder mehrere Drähte gewickelt, um Verwechslungen zu vermeiden (siehe Anhang ab S. 61).

| Hersteller | Material | Produkt         | Normen                    |
|------------|----------|-----------------|---------------------------|
| Novamont   | Mater-Bi | Bioabfallbeutel | EN 13432,<br>ASTM D 6400  |
| BASF       | ecovio®  | Bioabfallbeutel | EN 13432,<br>ASTM D 6400, |
| Duni       | PLA      | Plastikbecher   | EN 13432                  |

Tabelle 3: Die Materialien mit den entsprechenden Herstellern, den zertifizierten Normen und dem Produkt, aus welchem die Probe entnommen wurde

In den Wochen 0, 1, 3, 5, 7, 10 und 12 wurden die Proben gewogen. Dafür wurden die Proben aus dem Kompost genommen, die Gitter wurden entfernt, Verunreinigungen wurden manuell abgelöst und die Inhalte in Petrischalen gesammelt (siehe Anhang ab S. 61). Die Wägung der Proben erfolgte durch eine Mettler-Ultramikropräzisionswaage, welche eine Messgenauigkeit von 0.1 µg hatte. Die Messung erfolgte in einem klimatisierten Raum mit konstanter Luftfeuchtigkeit und Temperatur (22 °C /48rh ). Um eine Verfälschung durch zu hohen oder tiefen Wasseranteil der Proben zu vermeiden, wurden die Proben zwischen 20-24h in diesem klimatisierten Raum konditioniert. Dazu wurden die Proben, bevor sie gewogen wurden, auf optische Extremitäten überprüft, fotografiert und anschliessend wurde jede Probe drei Mal gewogen. Im Laufe des Versuches wurden die Proben immer spröder und zerfielen in immer kleinere Bestandteile, weswegen die Fragmente auf ein Alupapier gelegt wurden, wie man in Abb. 29 erkennen kann. Um das Gewicht auszurechnen, wurde dann zuerst das Alupapier gewogen und anschliessend vom Gesamtgewicht (Probe und Alupapier) abgezogen (für genaue Wägungsdaten siehe Anhang ab S. 63). Nach der Wägung wurden die Proben wieder im Gitter eingepackt und im Komposthaufen inkubiert.



Abb. 29: Wägung vom Material ecovio® in der Woche 3 aus 3 Perspektiven nach 24h Konditionierung



## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Einflussfaktoren in der Kompostierung

Um die Fragestellung, inwiefern BAW kompostierbar sind, zu überprüfen, mussten die Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren in der Kompostierung untersucht werden, um anschliessend die Ergebnisse deuten zu können.

#### 5.1.1 Temperatur

Der Temperaturverlauf des Komposts, der Aussentemperatur und der Luftfeuchtigkeit in der Kompostumgebung sind in der Abb. 30 dargestellt.

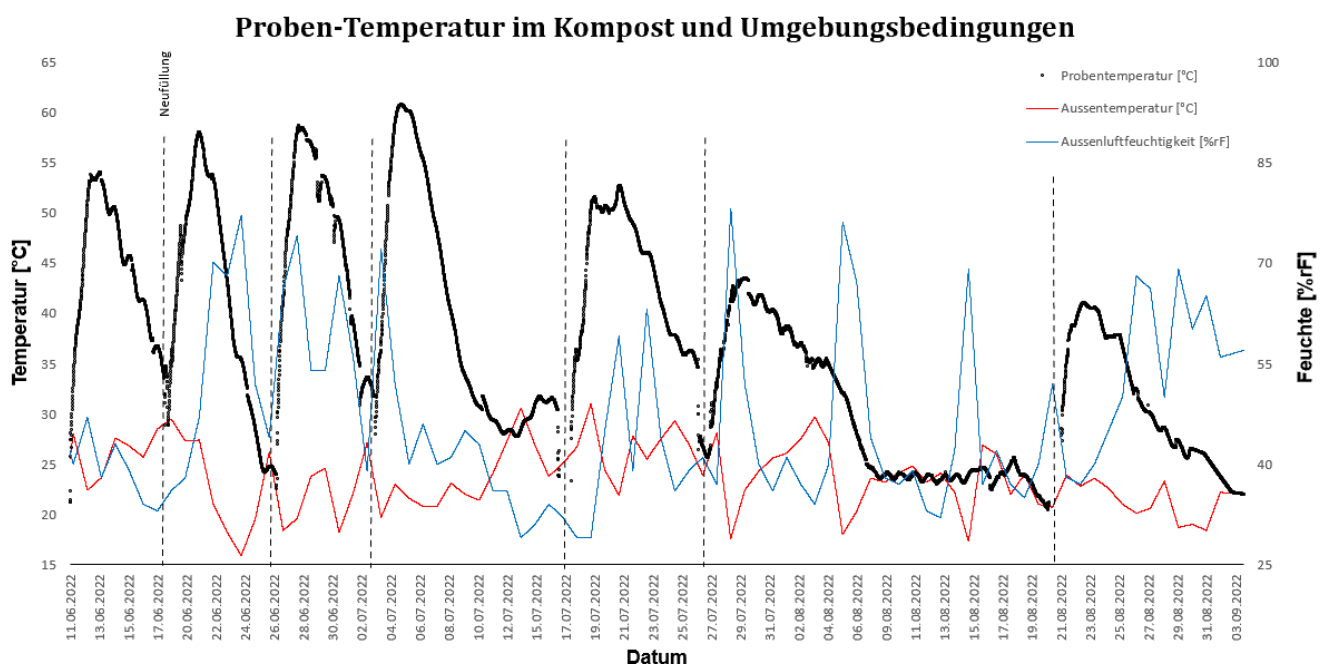


Abb. 30: Temperaturverlauf der Komposttemperatur sowie der Aussentemperatur und die Luftfeuchtigkeit in der Kompostumgebung während 12 Wochen

Die Temperatur des Komposts zeigte einen stetigen Zyklus, bei dem die Temperaturen bis auf maximal 60,8 °C anstiegen und anschliessend innert 2 Wochen auf die Aussentemperatur absanken. Insgesamt waren die Temperaturen 20 Tage im thermophilen Bereich von 45 °C bis 60 °C. Die Aussentemperaturen schwankten während des Versuches zwischen 17-30 °C und betrug im Durchschnitt 23,6 °C. Die Luftfeuchtigkeit befand sich während der 12 Wochen zwischen 30-80 % mit einer durchschnittlichen Luftfeuchtigkeit von 46,7 %. Der Zyklus der Komposttemperatur lässt sich auf die neuen Rohmaterialien, welche in den Wochen 1, 2, 3, 5, 7, 10 hinzugefügt wurden, zurückführen. Diese neuen Rohmaterialien wurden von den Mikroorganismen abgebaut, wodurch neue metabolische Wärme entstand, welche wiederum den Komposthaufen erwärmte. Der schnelle Abstieg der Temperatur ist auf das geringe Volumen des Komposthaufens und die geringe Menge an organischen Materialien zurückzuführen. Denn durch das geringe Volumen ist der Kompost nicht genug gut isoliert und die Kompostmiete kühlte schnell ab. Nach Satyanarayana und Grajek (1999) ist die Selbsterwärmung nur möglich, wenn genug organisches Material und genügend Masse zur Isolation vorhanden ist, sofern Wassergehalt,

Sauerstoffverfügbarkeit und Nährstoffgehalt adäquat sind [29]. Somit kann der doppelwandig isolierte Thermokompost nicht den Wärmeverlust des geringen Volumens von 250 l kompensieren. Dazu führt die geringe Menge an Substraten ebenfalls dazu, dass zu wenig Nahrung für Mikroorganismen zur Verfügung stand und nachdem alles Material in der thermophilen Phase abgebaut wurde, keine weitere metabolische Wärme durch Mikroorganismenaktivität mehr entstand. Um dies zu kompensieren, wurden in unregelmässigen Perioden neue Materialien hinzugefügt, um die Mikroorganismenaktivität zu fördern.

### 5.1.2 pH-Wert

Der pH-Wert während 12 Wochen im Kompost ist in der Abb. 31 illustriert.

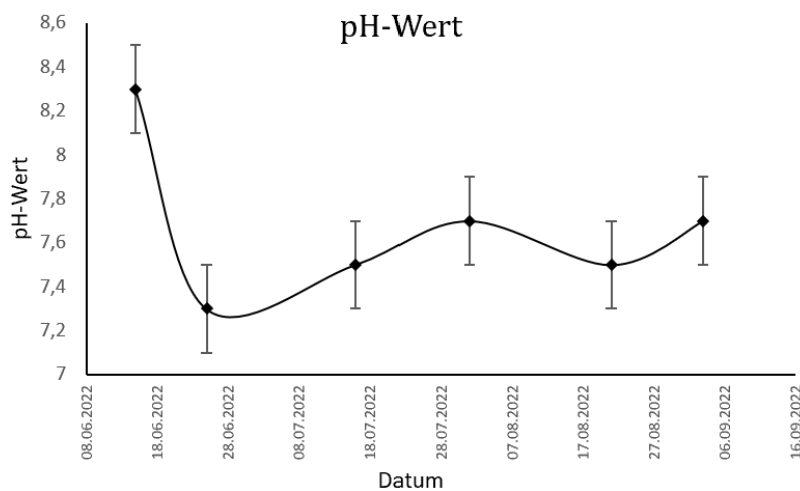


Abb. 31: Verlauf des pH-Wertes des Kompostes binnen 12 Wochen

Der pH-Wert war am Anfang des Versuches 8.3 pH und sank während des Versuches auf einen pH-Wert von bis zu 7.3 pH. Anschliessend stieg der pH-Wert wieder bis auf 7.8 pH an. Es wurde ein Fehler von 0.2 verwendet, da die Farben auf dem pH-Messstreifen nicht immer eindeutig zu erkennen und zu unterschieden waren (siehe Anhang S. 60). Die Senkung des pH-Wertes zu Beginn des Versuches ist wie in der Theorie bereits beschrieben auf die Bildung von organischen Säuren als Zwischenprodukte, die Nitrifikation und die Produktion von CO<sub>2</sub> zurückzuführen [31]. Es konnte auch ein Anstieg des pH-Wertes gegen Ende der Kompostierung beobachtet werden, welches ebenfalls mit der Theorie übereinstimmt. Denn je länger die Kompostierung dauert, desto mehr stabile Humusverbindungen werden aufgebaut und die organischen Säuren werden mineralisiert, welches ebenfalls zu einem Anstieg des pH-Wertes führt [31]. Grundsätzlich befand sich der pH-Wert während des Versuches immer im optimalen Bereich von 7 bis 8 pH für Mikroorganismen.

### 5.1.3 C/N-Verhältnis

Das C/N-Verhältnis ist in der Abb. 32 dargestellt. Das höchste C/N-Verhältnis betrug 29/1 und war am Anfang der Kompostierung, währenddessen das C/N-Verhältnis im Laufe der Kompostierung ständig sank und ein Minimum von 24/1 in der Woche 12 erreichte. Es wurde ein Fehler von 5 verwendet, aufgrund der variierenden Daten für gewisse C/N -Verhältnisse der verschiedenen Substrate. Das sinkende C/N-Verhältnis ist auf die Rohmaterialien zurückzuführen, welche in den Wochen 1, 2, 3, 5, 7, 10 hinzugefügt wurden und immer ein C/N-Verhältnis von 20/1 hatten. Somit

senkten die Rohmaterialien sukzessive das C/N-Verhältnis, welches am Anfang des Versuches etwa 29/1 betrug. Dabei befand sich das C/N-Verhältnis immer im nach GLATHE (1985) optimalen Bereich von 20/1 bis 35/1.

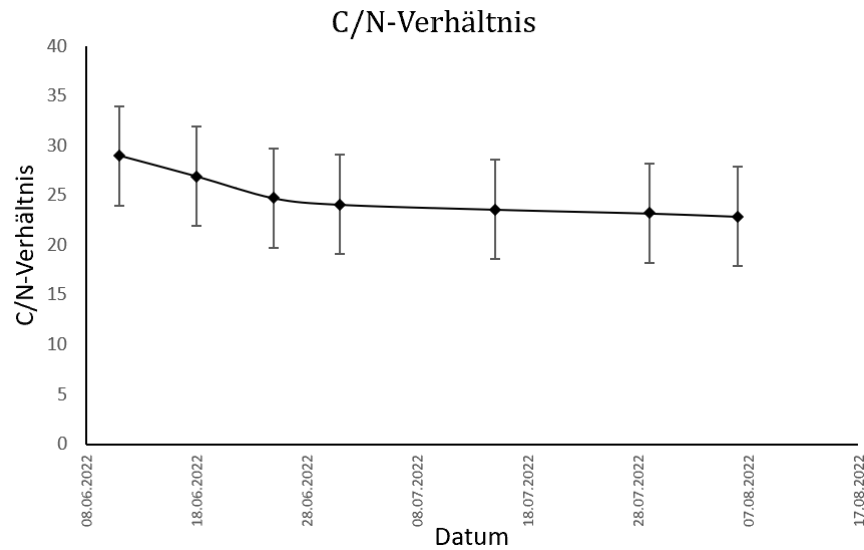


Abb. 32: Das C/N-Verhältnis der Rohmaterialien, welche dem Kompost hinzugefügt wurden

### 5.1.4 Mikroorganismenaktivität

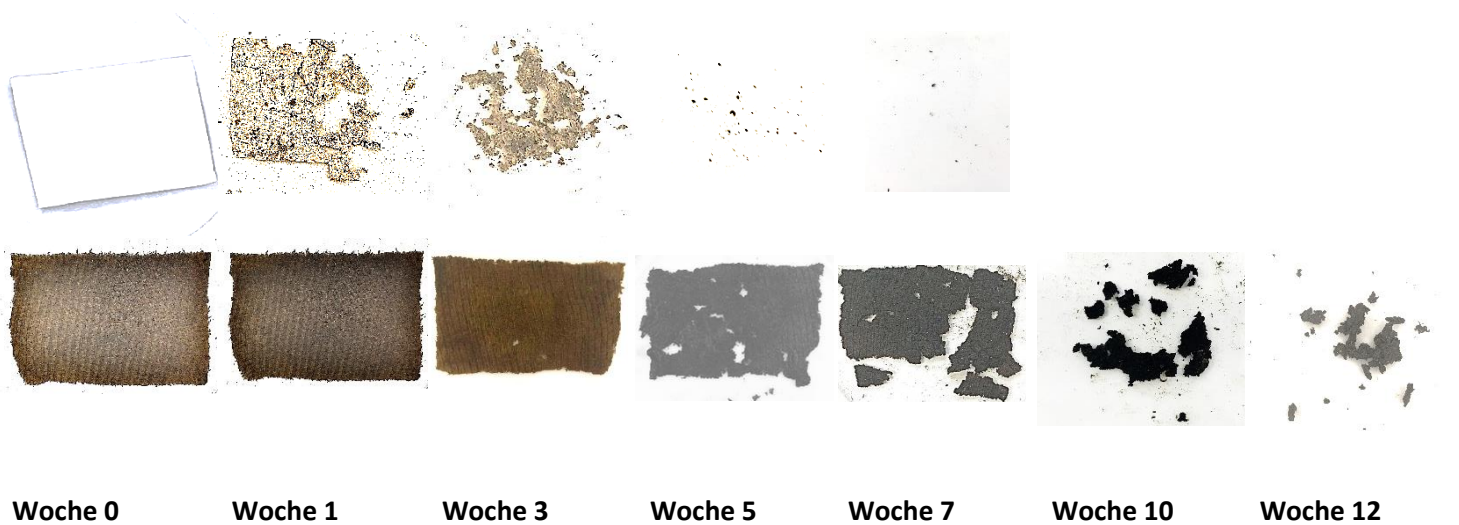


Abb. 33: Biologischer Abbau der Positivproben Papier und Baumwolle binnen 12 Wochen

| Wochen | Tage [d] | Baumwolle [%] | Papier [%] |
|--------|----------|---------------|------------|
| 0      | 0        | 100,0         | 100,0      |
| 1      | 7        | 99,7          | 60,2       |
| 3      | 21       | 91,6          | 23,7       |
| 5      | 35       | 66,2          | 1,2        |
| 7      | 49       | 55,4          | 0,4        |
| 10     | 70       | 38,1          | 0          |
| 12     | 84       | 29,7          | 0          |

Tabelle 4: Massenverlust der beiden Positivproben Baumwolle und Papier in % innert 84 Tagen

Die Mikroorganismenaktivität konnte an den Positivproben Baumwolle und dem Papier nachgewiesen werden, welche beide einen signifikanten Abbau während des Versuches zeigten, wie in Abb. 33/Tabelle 4 dargestellt. Die Baumwolle wurde innert 12 Wochen zu 70,3 % abgebaut und das Papier war bereits nach 5 Wochen zu 98,8 % abgebaut, während es binnen 12 Wochen gänzlich desintegriert wurde. Da Baumwolle eine Naturfaser ist, besteht sie etwa zu 88-96 % aus Zellulose [51], somit sollte es von den Mikroorganismen problemlos hydrolytisch gespalten werden. Dazu besteht Papier entweder aus *Zellstoff* oder *Holzstoff* (Holzschild). Zellstoff besteht gänzlich aus Zellulose, während Holzstoff einen hohen Anteil von Lignin hat und somit robuster ist [52]. Für das konventionelle Papier, welches in diesem Versuch verwendet wurde, kann man auf einen hohen Anteil von Zellstoff schliessen.

Dazu konnte man während der Kompostierung Hyphen von thermophilen Pilzen oder Actinobacteria erkennen (siehe Anhang S. 59). Diese Hyphen waren vor allem bei Temperaturen zwischen 50-60 °C erkennbar, welches ein starkes Indiz ist, dass diese Hyphen von Actinobacteria stammten, welche den Kompost normalerweise in diesem Temperaturbereich besiedeln [29].

In der Aufbauphase konnte man ebenfalls Rosenkäferlarven, Asseln, Regenwürmer, Tausendfüssler sowie andere Lebewesen der Makrofauna erkennen (siehe Anhang S. 59). Die Rosenkäferlarven ernähren sich vor allem von Pilzen abgebautem Holz, wodurch die Besiedlung dieser Organismen ebenfalls auf die Aktivität von Pilzen im Kompost schliessen lässt.

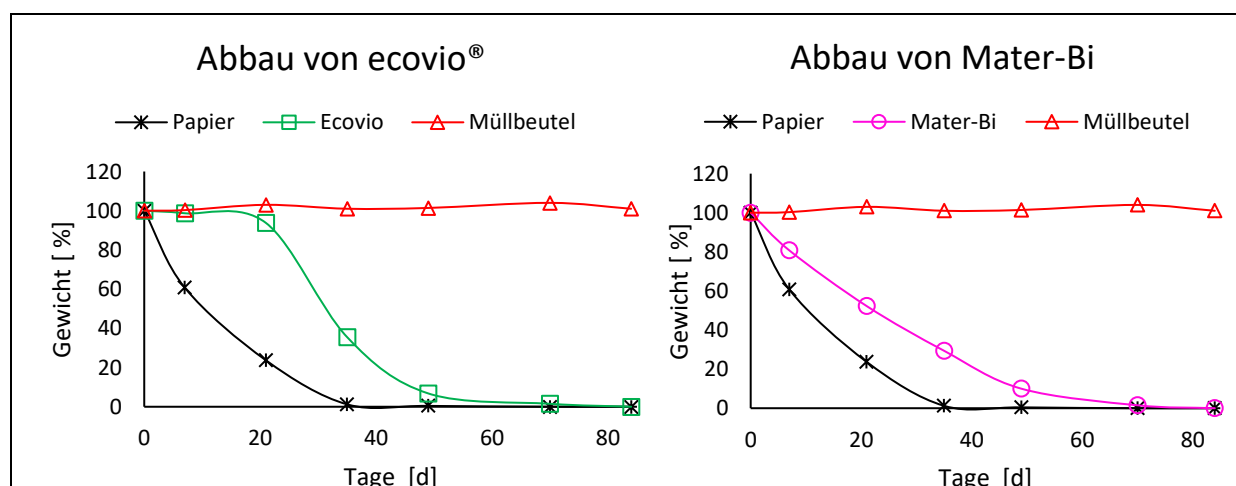
Dazu wurden die Rohmaterialien, welche in unregelmässigen Perioden hinzugefügt wurden, immer gänzlich abgebaut (siehe Anhang S. 60). Dieser intensive Abbau und die hohen Temperaturen von >60 °C lassen sowohl auf eine hohe Mikroorganismenaktivität schliessen sowie auf eine grosse Artenvielfalt, da die Vielzahl der diversen Substrate abgebaut wurden.

## 5.2 Biologische Desintegration von biologisch abbaubaren Werkstoffen

Um zu beantworten, ob BAW kompostierbar oder biologisch abbaubar sind, müssen diese die Normen, welche mit solch einer Bezeichnung einhergehen, einhalten. Dafür wurde der Massenverlust der verschiedenen Polymeren untersucht und überprüft, ob diese die Anforderungen einhalten oder nicht.

### 5.2.1 Einhaltung der Richtlinien

Der Abbau von den verschiedenen biologisch abbaubaren Werkstoffe in Bezug auf die Positiv und Negativprobe sind in der Abb. 34 aufgezeichnet.



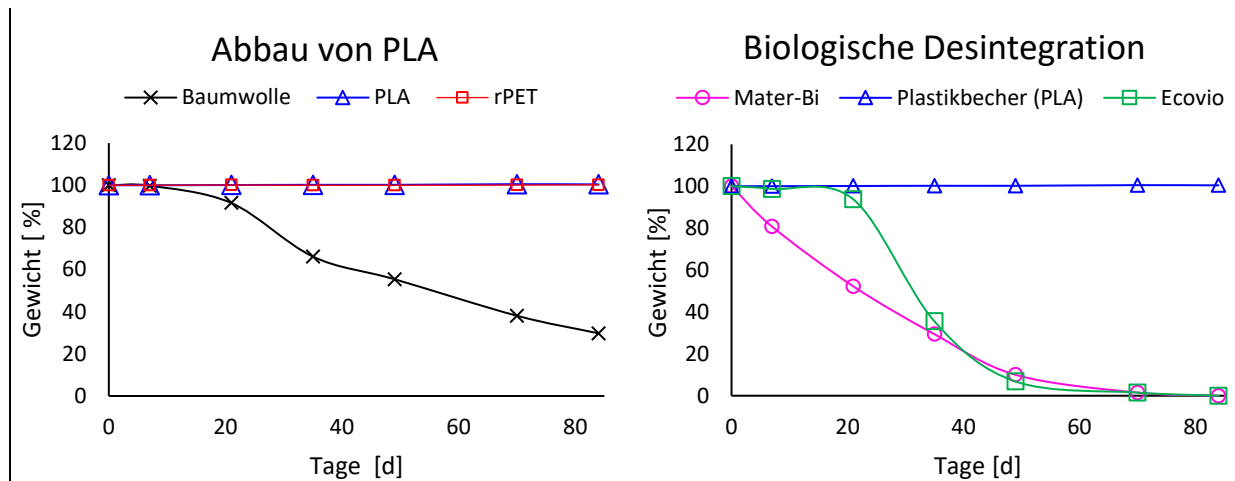


Abb. 34: Biologische Desintegration der BAW ecovio®, Mater-Bi und PLA in Bezug auf die Positivproben Papier respektive Baumwolle und Negativproben PE respektive rPET

| Wochen | Tage [d] | Mater-Bi [%] | ecovio® [%] | PLA [%] |
|--------|----------|--------------|-------------|---------|
| 0      | 0        | 100,0        | 100,0       | 100,0   |
| 1      | 7        | 80,7         | 98,7        | 100,0   |
| 3      | 21       | 52,2         | 93,8        | 100,1   |
| 5      | 35       | 29,4         | 35,5        | 100,2   |
| 7      | 49       | 9,9          | 6,8         | 100,2   |
| 10     | 70       | 1,3          | 1,3         | 100,5   |
| 12     | 84       | 0            | 0           | 100,4   |

Tabelle 5: Biologische Desintegration von Mater-Bi, ecovio® und PLA innert 12 Wochen in %

## Verfahren

Nach den Richtlinien von EN 13432 ist kein spezielles Verfahren genannt, um die Kompostierbarkeit von Werkstoffen zu testen, sondern fordert eine Techniksprüfung in der eine typische aerobe Kompostierung simuliert werden soll. Also sollten die Bedingungen, welche während einer gut geführten Heissrottephase herrschen, simuliert werden. Bei der amerikanischen Norm wird jedoch eine konstante Temperatur von  $58 \pm 2$  °C vorgegeben oder eine praktische Prüfung in einer industriellen Kompostieranlage. Aufgrund der verwendeten Mittel dieses Versuches konnte somit das Testverfahren von der amerikanischen Norm nicht repliziert werden und es wurde versucht, eine industrielle Kompostierung zu simulieren. Jedoch kann man davon ausgehen, dass wenn das Polymer das Prüfungsverfahren, welches in diesem Versuch simulierten wurde, erfolgreich besteht, dass es auch das Prüfungsverfahren der Norm ASTM D6400 zur biologischen Desintegration bestehen würde. Eine industrielle Kompostieranlage ist definiert, dass sie Temperaturen von  $> 55$  °C erreicht, welche in der simulierten Kompostieranlage in diesem Versuch erreicht wurden und somit den Anforderungen der Normen entspricht.

Um die Prüfung der biologischen Desintegration zu bestehen, muss bei beiden Normen ein Massenverlust von 90 % in 12 Wochen nach einer Siebung durch ein 2 mm Sieb stattgefunden haben. Die Siebung fand beim Versuch direkt durch die Gitternetze mit Maschengrösse 2 mm statt und somit musste keine zusätzliche Siebung vorgenommen werden.

## Richtlinien

Das Material Mater-Bi wurde innert 7 Wochen zu 90 % abgebaut und binnen 12 Wochen gänzlich kompostiert. Dabei zeigte das Material bis zur Woche 7 einen linearen Abbau. Auf der anderen Seite wurde der biologisch abbaubare Werkstoff ecovio® nach 7 Wochen zu 93,2 % abgebaut und war ebenfalls gänzlich nach 12 Wochen desintegriert worden. Der PLA Plastikbecher hingegen zeigte keinen Abbau, denn bis zur 12. Woche konnte kein Massenverlust nachgewiesen werden. Er wurde sogar im Verlauf des Versuches schwerer. Alle drei Kunststoffe waren mit der europäischen Norm (EN 13432) zertifiziert, während ecovio® und Mater-Bi zusätzlich durch die amerikanische zertifiziert wurden. Somit sollten alle Materialien einen Abbau von 90 % innert 12 Wochen erreichen. Sowohl ecovio® als auch Mater-Bi konnten diese Bedingungen einhalten, der PLA-Plastikbecher konnte jedoch keinen Abbau nach 12 Wochen kennzeichnen. Dies könnte zum einen an der höheren Dichte des PLA-Plastikbecher liegen, welcher die zweifache Dichte der anderen Bioplastikarten besass. Jedoch konnte der PLA-Becher die Richtlinie nicht erfüllen, obwohl er von der Organisation TÜV Austria als biologisch abbaubar zertifiziert wurde.

Somit kann die Fragestellung, ob die Herkunft der Polymere einen Einfluss auf die Abbaubarkeit hat, teilweise beantwortet werden. Sowohl Mater-Bi als auch ecovio® haben petrochemische und biologische Bestandteile und wurden vollständig desintegriert, das reine PLA auf der anderen Seite war biobasiert und konnte nicht abgebaut werden. Somit hat nicht die Herkunft der Polymere einen Einfluss auf die biologische Abbaubarkeit, sondern ausschliesslich die chemische Zusammensetzung.

### 5.2.2 Art des Abbaus

Um zu klären, ob das Abbauverhalten der Kunststoffe variiert und ob dieser Unterschiede durch die Herkunft der Polymere in Verbindung steht, wurde ebenfalls der visuelle Abbau festgehalten, um Rückschlüsse auf die obengenannte Fragestellung zu geben.

#### Mater-Bi

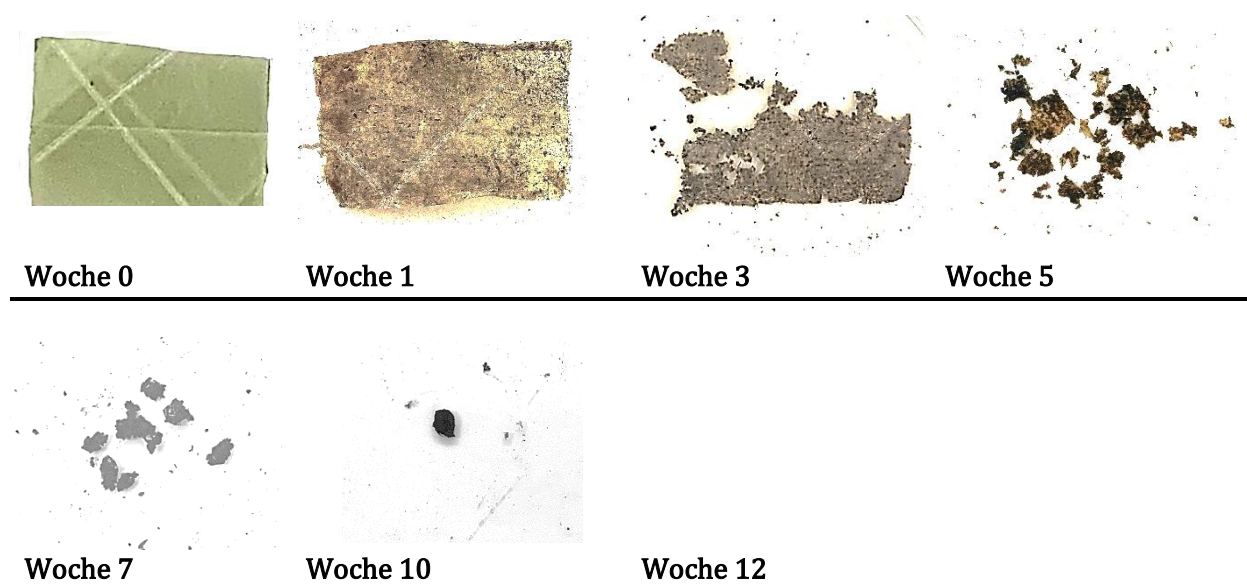


Abb. 35: Biologische Desintegration von Mater-Bi innert 12 Wochen

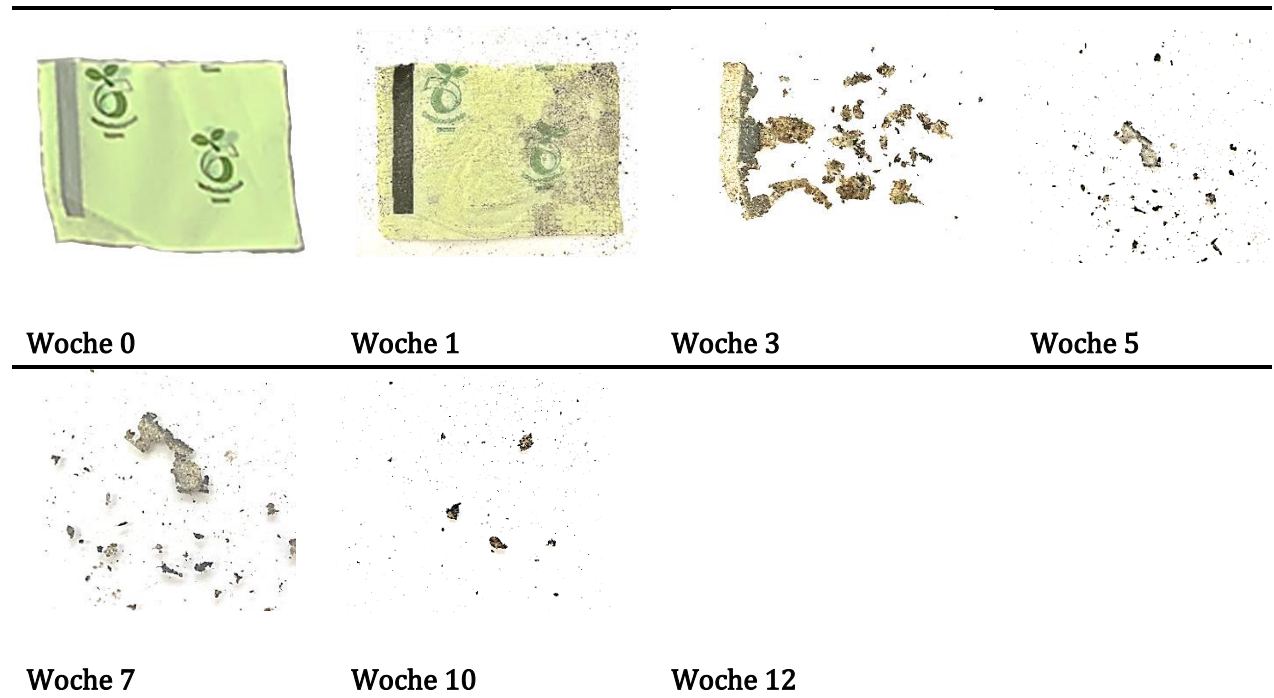
ecovio®

Abb. 36: Visueller Abbau von Ecovio während 12 Wochen

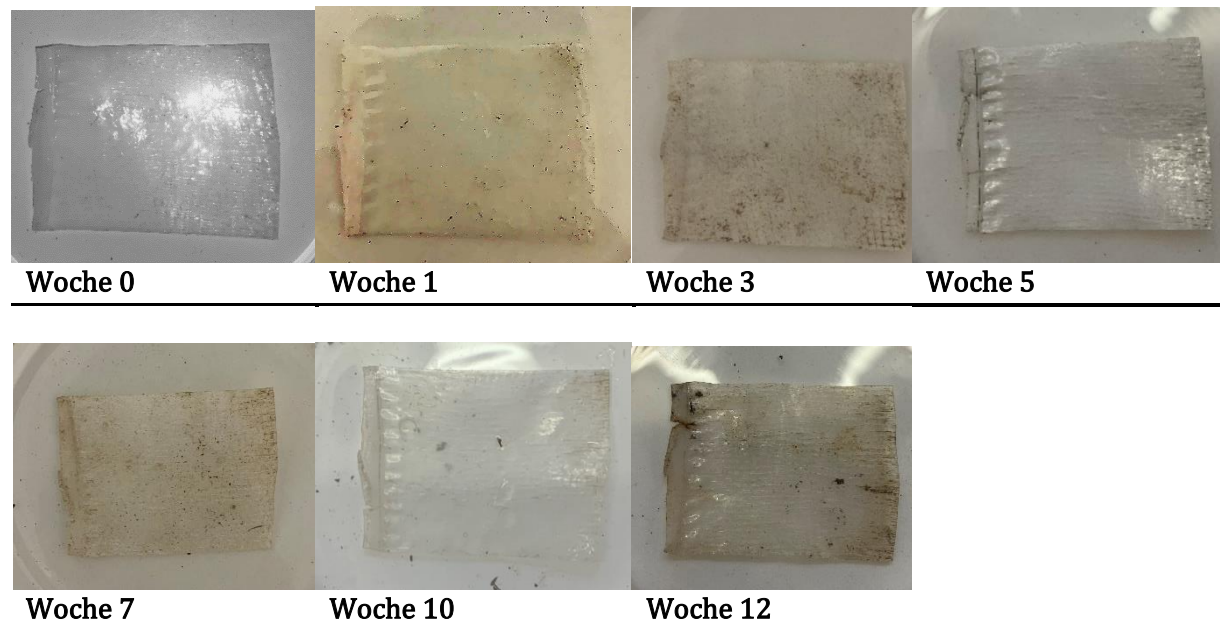
PLA

Abb. 37: Biologischer Abbau von PLA binnen 12 Wochen

**Woche 0****Woche 1****Woche 3****Woche 5****Woche 7****Woche 10****Woche 12****Abb. 38: Biologischer Abbau von einem PLA-Becher innert 12 Wochen**

### PE

**Woche 1****Woche 12****Abb. 39: Biologischer Abbau von PE während 12 Wochen**

### rPET

**Woche 1****Woche 12****Abb. 40: Biologischer Abbau von rPET innert 12 Wochen**



## Mater-Bi

Bei Mater-Bi fand ein linearer Abbau bis zur Woche 7 statt, wobei nach 12 Wochen das Material komplett biologisch kompostiert war (siehe Abb. 34). Man konnte bereits ab der ersten Woche Spuren von biologischem Abbau nachweisen, sowohl optisch als auch am Massenverlust, wie man in der Abb. 35 sehen kann. Der Massenverlust war nach der ersten Woche sehr viel signifikanter als der von ecovio®. Dieser schnelle Massenverlust von Beginn an lässt auf einen grossen Anteil von Stärke in Mater-Bi schliessen. Diese Stärkebestandteile können von den Mikroorganismen direkt aufgenommen und metabolisiert werden, ohne dass sie diese zuerst in ihre Bestandteile zerlegen müssen[12]. So muss die Stärke nicht zuerst hydrolysiert werden, welches oft der geschwindigkeitsbestimmende Schritt darstellt [26]. Anschliessend verlor der Kunststoff latent an Gewicht, was auf den langsameren Abbau des Copolymer Polyvinylalkohol schliessen lässt, welches zuerst in wasserlösliche Fragmente hydrolysiert werden musste. Bei Polyvinylalkohol erfolgt die enzymatische Spaltung der Kohlenstoffhauptkette durch eine Dehydrogenase. Durch diesen Abbauverlauf kann man auch erkennen, dass Mater-Bi ein Polymerblend ist und eine rein physikalische Mischung nicht aber eine chemische ist. Denn die Stärke konnte zuerst von den Mikroorganismen metabolisiert werden, während das andere Polymer zuerst hydrolysiert werden musste. Bei einem Copolymer wie ecovio® bestehen alle Ketten des Polymers jedoch aus denselben chemischen Bestandteilen, wodurch die Mikroorganismen nicht zuerst gewisse Bestandteile metabolisieren konnten wie bei einer Mater-Bi-Probe.

## ecovio®

Beim ecovio® Plastik konnte man bereits nach der ersten Woche Spuren von biologischem Abbau ausfindig machen, wie man in der Abb. 36 sehen kann. Jedoch war der Abbau von ecovio® anfangs nur langsam und nahm ab Woche 3 fast exponentiell ab und war in Woche 7 sogar stärker desintegriert worden als Mater-Bi. Ab Woche 7 flachte der Abbau wieder ab und in Woche 12 war der Werkstoff vollständig kompostiert. Der vollständige Verlauf des Abbaus ist in Abb. 34 dargestellt und in der Tabelle 4 (siehe S. 42) quantifiziert. Dieser Verlauf lässt sich dadurch erklären, dass zuerst das Copolymer hydrolysiert werden musste, welches den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt darstellte. Durch den fortlaufenden Abbau und den sukzessiven Molekulargewichtsverlust respektive den kürzer werdenden Polymerketten wurde es dem Wasser jedoch erleichtert, das Polymer zu spalten, da sich Enzyme besser anlagern konnten, wodurch ab Woche 3 ein exponentieller Abbau festgestellt werden konnte. Anders als Mater-Bi ist ecovio® ein Copolymer, denn es stellt eine chemische Mischung zweier Monomere (PLA und PBAT) dar. Es mussten zuerst alle Polymerketten hydrolysiert werden. Die Mikroorganismen konnten nicht wie bei Mater-Bi die Stärkebestandteile direkt abbauen.

## PLA

Bei PLA konnte man bis zur Woche 12 keinen quantitativen Massenverlust feststellen. Das Material wurde schon ab Woche 1 milchig oder blass, wie man in der Abb. 37/38 sehen kann. Dies könnte auf die hohen Temperaturen im Kompost zurückzuführen sein, welche nahe bei der *Glastemperatur* von PLA liegen. Denn es wurden Temperaturen von etwa 60.8 °C erreicht und die Glastemperatur von PLA liegt bei nur 60 °C. Es konnte schon in vorherigen Experimenten mit PLA

von Sin, Lee Tin (2019) dieses Phänomen festgestellt werden, bei denen auf eine Zerstörung der molekularen Struktur geschlossen wurde aufgrund der Überschreitung der Glasübergangstemperatur [12].

Auf der Oberfläche konnte man schon ab Woche 3 einen leichten Abbau erkennen, jedoch ausschliesslich beim ganzen Becher. Dort konnte man beobachten, dass die aufgedruckten Richtlinien und Materialeigenschaften am Boden des Bechers nicht mehr erkennbar waren. Somit kann man auf einen minimalen Abbau an der Oberfläche des PLA-Bechers schliessen. Dieser Oberflächenabbau kann die Transparenz natürlich auch beeinflussen, da so das Licht an der Oberfläche gestreut wird.

Man kann beim PLA-Becher immer mehr Risse beobachten, welche durch Bioerosion und Erosion verursacht wurden (siehe Abb. 38). Je länger der Versuch andauerte, desto spröder und unstabiler wurde das Material. Auch beim PLA-Stück, welches in einem Gitter eingepackt wurde, konnte man einen gewissen Verlust der Materialeigenschaften beobachten. So war das Material nicht mehr so robust wie zum Beispiel der rPET-Kunststoff sondern wirkte dünner und schon bei kleinster mechanischer Belastung fing der PLA-Kunststoff an zu brechen. Dieser Verlust der *Schlagzähigkeit* und Elastizität kann auf die immer kürzer werdende Kettenlänge des Polymers und der damit einhergehenden Beeinträchtigung der Primärstruktur erklärt werden. Dadurch werden auch die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes beeinträchtigt. So wurde herausgefunden, dass eine Verringerung des Molekulargewichts zu einer verminderten Schlagzähigkeit und zu einer geringeren Flexibilität führen [53]. Diese mechanischen Eigenschaften decken sich mit den beobachteten Ergebnissen des Versuches.

Dazu blieb die Form weitgehend unverändert bei der PLA Probe im Gitter, während der PLA-Becher bis auf die Risse und Fragmentierung keinen biologischen Abbau zeigte, wie die Abb. 37/38 illustrieren. Die Risse im Becher sind auf den Druck des darüberliegenden Materials zu erklären (Erosion). Die weitgehend unveränderte Form ist, wie in der Theorie beschrieben, auf die Bestandteile, welche lange nicht wasserlöslich sind, zurückzuführen. Dadurch nimmt das Molekulargewicht des Kunststoffes latent ab, während die äussere Form sowie das Gewicht unverändert bleiben [23].

## 5.3 Begrenzungen

### 5.3.1 Temperaturschwankungen

Eine signifikante Einschränkung bei meinen Versuchen stellten die Temperaturschwankungen dar, die auf einen schnellen Wärmeverlust hindeuten. Dieser Wärmeverlust war, wie in der Diskussion bereits erläutert, auf das geringe Volumen des Komposts zu schliessen. Dadurch verlor der Kompost binnen zwei Wochen seine gesamte Wärme und sank auf das Niveau der Aussentemperatur. Die Temperaturen bei einer normalen industriellen Kompostieranlage nach Fricke, Klaus (1990) sinken erst zwischen 80 bis 120 Tagen auf das Niveau der Aussentemperatur [26]. Diesen Verlauf konnte ich nicht in gleichem Masse simulieren. Dazu waren auch zu wenige organische Materialien im Kompost, was ebenfalls ein Grund für den schnellen Wärmeverlust war, da es keine weiteren Materialien für die Mikroorganismen zum Zersetzen gab. Um diesen Wärmeverlust zu kompensieren, fügte ich dem Kompost neue Rohmaterialien hinzu, um eine vergleichbare thermophile Phase zu erreichen. Dies führt jedoch dazu, dass der natürliche Verlauf der Kompostierung gestört wurde und dies könnte auch negative Einflüsse auf die Mikroorganismen gehabt haben.

### 5.3.2 Analysemethoden für die Kompostierung

Das C/N-Verhältnis konnte man nur mit allgemeinen Daten vergleichen, welche oft stark verallgemeinert wurden. So werden zum Beispiel Gartenabfälle mit einem C/N-Verhältnis versehen, wobei es auch in den Gartenabfällen starke Variationen des besagten Verhältnisses gibt. Dazu variierten diese Daten in Bezug der Quelle, welche man verwendete. Es ist natürlich möglich, das C/N-Verhältnis genau zu bestimmen. Jedoch müsste jedes dem Kompost zugefügtem Material bei 950 °C oxidiert werden und anschliessend der Kohlenstoff und Stickstoffanteil bestimmt werden. Es war nicht möglich, die nötigen Rahmenbedingungen für einen solchen Versuch zu imitieren.

Der Wassergehalt konnte nur optisch überprüft werden. Es wäre auch möglich gewesen, diesen quantitativ zu bestimmen. Dies überschritt jedoch die verfügbaren Mittel, wodurch ausschliesslich eine optische Analyse des Wassergehalts vorgenommen wurde. Dadurch konnte man den Wassergehalt nicht quantitativ bestimmen und somit auch nicht überprüfen, ob er sich im optimalen Bereich von 40-55 % befand.

Genauso konnte das Porenvolumen nur mit den hinzugefügten Substraten bestimmt werden. Auf diese Weise kann man das Porenvolumen nicht genau bestimmen und so auch nicht dem optimalen Bereich von 30-40 % anpassen. Es würde auch hier ein quantitatives Mass geben, um dieses genau zu kalkulieren nämlich die Schüttdichte.

### 5.3.3 Analysemethode für den biologischen Abbau

Wie die biologisch abbaubaren Werkstoffe abgebaut wurden, konnte man in dieser Arbeit nur optisch und durch den Massenverlust erfassen. Somit war es nicht möglich zu bestimmen, wie das Molekulargewicht der Kunststoffe im Verlaufe des Versuches abgenommen hat oder welche Bestandteile von Mater-Bi zuerst abgebaut wurden. Dazu konnten die mechanischen Veränderungen der Materialien teilweise nur interpretiert werden wie zum Beispiel die geringere Flexibilität des PLA-Kunststoffes. Ein weiterer Fehlerindikator stellten die Verunreinigungen dar, welche an den Proben hafteten und nur schwer zu entfernen waren. Durch dieses zusätzliche Gewicht der Erde nahm das Gewicht bei den Negativproben und PLA während des Versuches sogar zu. Zusätzlich konnte man mit dem Test auf Kompostierbarkeit ausschliesslich eine Desintegration, also eine Fragmentierung zu nicht mehr sichtbaren Bestandteilen beweisen. Man konnte jedoch nicht verifizieren ob ein biologischer Abbau, also eine Umwandlung zu Kohlenstoffdioxid, Wasser und Biomasse, stattgefunden hat.

## 6 Abschliessende Diskussion

Zur Beantwortung der Frage – Inwiefern sind biologisch abbaubare Kunststoffe kompostierbar und zeigen die verschiedenen Kunststoffe signifikante Unterschiede im Abbauverhalten, welche durch ihre Herkunft zu erklären sind? – wurde ein empirischer Versuch durchgeführt.

Im Laufe des Versuches konnte gezeigt werden, dass es erhebliche Unterschiede im Abbauverhalten der verschiedenen Kunststoffe gab und dass nicht alle BAW tatsächlich kompostierbar sind. In dem Versuch wurde die Kompostierbarkeit der verschiedenen Materialien untersucht, wobei der Versuch eine industrielle Kompostieranlage simulieren sollte. Die europäische und amerikanische Norm verlangen alle einen Abbau von 90 % der Materialien in 12 Wochen. Während ecovio® und Mater-Bi innert 12 Wochen gänzlich abgebaut wurden, zeigte der PLA-Becher keine Anzeichen eines tatsächlichen Abbaus. Somit konnten ecovio® und Mater-Bi die Anforderungen der europäischen und amerikanischen Norm erfüllen, während PLA keines der besagten Prüfungsverfahren bestehen konnte.

Dieses Abbauverhalten ist auf die Struktur der verschiedenen biologisch abbaubaren Werkstoffe zurückzuführen, nicht aber auf ihre Herkunft. Somit ist es gleichgültig, ob die Polymere aus fossilen oder nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Denn sowohl Mater-Bi als auch ecovio® bestehen zum Teil aus fossilen und nachwachsenden Bestandteilen, welche beide abgebaut wurden. PLA hingegen ist ein Kunststoff, welcher gänzlich aus nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert wird. Jedoch zeigte dieser keinen Massenverlust während der 12 Wochen in denen der Versuch durchgeführt wurde.

Durch den Massenverlust und die visuelle Betrachtung konnte ebenfalls auf den Aufbau sowie das Abbauverhalten der BAW geschlossen werden. So zeigte der Stärkeblend Mater-Bi einen Abbau von Anfang an aufgrund der Stärkebestandteile im Polymer. Ecovio® hingegen wurde, je länger der Versuch andauerte, schneller abgebaut, welches auf die kürzeren Kettenlängen respektive das tiefere Molekulargewicht zurückzuführen ist, wodurch intramolekulare Bindungen besser hydrolysiert werden konnten. PLA zeigte einen signifikanten Verlust der Materialeigenschaften, nicht aber der Masse. So wurde PLA von einem stabilen, schlagzähen Material zu einem spröden Kunststoff, welcher bei leichtester Druckspannung zerbrach. Dazu wurde PLA weniger flexibler im Laufe des Versuches und schon ab der ersten Woche verlor der BAW seine Transparenz und wurde milchig. Diese Veränderung der Materialeigenschaften ist das Resultat eines signifikanten Verlustes des Molekulargewichts und der Veränderung der chemischen Struktur durch die Überschreitung der Glastemperatur. Aufgrund der schlechten Wasserlöslichkeit hat der PLA Kunststoff seine äussere Form nicht verändert und hat somit auch keinen Massenverlust gezeigt.

Diese Arbeit konnte somit beweisen, dass es erhebliche Unterschiede in der Abbaucharakteristik der drei verschiedenen BAW ecovio®, Mater-Bi und PLA gibt und dass diese nicht mit der Herkunft, sondern mit der Struktur der Polymere zu erklären sind. Somit sind ecovio® und Mater-Bi gänzlich kompostierbar und halten die Bedingungen ein, welche mit solch einer Bezeichnung einhergehen, während PLA keine Anzeichen eines biologischen Abbaus zeigte.

## 7 Ausblick

Diese Untersuchung zeigte, dass nicht alle BAW die Fähigkeiten, welche sie suggerieren, einhalten. Aufgrund der natürlichen Schwankungen der Komposttemperatur und dem zyklischen Temperaturverlauf durch die Rohmaterialien konnte nicht abschliessend geklärt werden, ob der PLA-Becher des Herstellers Duni tatsächlich kompostierbar ist. Deswegen würde sich weiterführende Forschung dieses Produktes empfehlen, indem man das Produkt einer praktischen Prüfung in einer industriellen Kompostieranlage und in einem Technikumsmassstab mit optimalen Kompostierungsbedingungen unterzieht. Dabei würde der Abbau des Materials nicht durch natürliche Bedingungen beeinflusst werden.

Jedoch stellt sich die Frage, wie sinnvoll die Normen sind, welche diese Produkte zertifizieren. Denn in konventionellen Kompostieranlagen sind BAW genauso natürlichen Schwankungen ausgesetzt, wodurch es zu einem verzögerten Abbau kommen kann. Jedoch setzen die Prüfungsverfahren der europäischen und amerikanischen Norm beide eine technische Prüfung voraus, bei der eine typische, optimale aerobe Kompostierung simuliert wird. Dadurch wird jedoch nicht in Betracht gezogen, dass in der Realität die industriellen Kompostieranlagen ebenfalls natürlichen Einflüssen wie Regen, Dürre und variierenden Substraten ausgesetzt sind, bei denen nicht durchgehend optimale abiotische Faktoren walten.

Es war auch nicht Teil dieser Arbeit, die Nachhaltigkeit von biologisch abbaubaren Werkstoffen zu überprüfen, jedoch wäre es essenziell für die Zukunft zu klären, ob biologisch abbaubare Kunststoffe dem Klimawandel entgegenwirken können. Dabei wäre auch weiterführende Forschung im Bereich der negativen Einflüsse von Biokunststoffen und der ihrer CO<sub>2</sub>-Bilanz unabdingbar. So könnte zum Beispiel die Kreuzkontamination in Kompostieranlagen untersucht werden. Sind durch Biokunststoffe auch mehr konventionelle, nicht abbaubare Kunststoffe in Kompostieranlagen zu finden? Zusätzlich sollte die Konkurrenz, die biobasierte Kunststoffe möglicherweise in Bezug auf Nahrungsmittelanpflanzung darstellt, untersucht werden. Diese Forschung müsste klären, ob die Anbauflächen für Rohstoffe, die zur Produktion von Biokunststoffen verwendet werden, in Konkurrenz zu den Anbauflächen für Lebensmittel stehen.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob BAW auch tatsächlich ein sinnvoller Lösungsansatz für die Weltverschmutzung darstellt und ob Recycling sowie Wiederverwertung nicht eine nachhaltigere Lösung sein würde. Um diese Frage zu beantworten, würde es eine detaillierte Untersuchung benötigen. Dabei sollte die CO<sub>2</sub>-Bilanz von konventionellen recycelten und biologisch abbaubaren Kunststoffen verglichen als auch die negativen sowie positiven Auswirkungen evaluiert werden. Dazu muss auch geklärt werden, inwiefern BAW recycelbar sind und ob diese nicht eventuell sogar das Recycling behindern.

Es zeigt sich, dass biologisch abbaubare Werkstoffe ein relevantes Forschungsgebiet darstellen. Die Forschung zu biologisch abbaubaren Werkstoffen kann und muss weitergehen. Weitere Untersuchungen wären unabdingbar, um negative Konsequenzen zu vermeiden und eine effektive, sinnvolle Lösung für das Plastikproblem zu finden, mit dem wir heute konfrontiert sind.

## Quellenverzeichnis

- [1] Plastikmüll-Teppich im Pazifik so groß wie Mitteleuropa » Umwelt-Klima-Energie (fachzeitungen.de); Plastikmüll im Ozean (Letzter Zugriff: 04.06.2022; 12:42)
- [2] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Biologisch abbaubare Kunststoffe. Dessau-Rosslau, 2009.
- [3] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/dossiers/biokunststoff-alles-abbaubar.html>; Terminologie Biokunststoffe (Letzter Zugriff: 01.07.2022; 18:04)
- [4] Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (Hrsg.): BAW VERGÄREN & KOMPOSTIEREN?. Produkt- und sortenspezifische Beurteilung der Eignung von biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW) zur Verwertung in Schweizer Biogas- & Kompostieranlagen. Wädenswil, 2016.
- [5] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (Hrsg.): Biokunststoffe. Gülzow, 2020.
- [6] Markus Weber: Neue Entwicklungen in der Zertifizierung von Produkten aus biologisch abbaubaren Werkstoffen. Vortrag, 2001.
- [7] Soil Control lab (Hrsg.): ASTM D 6400. Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions. California, 2010.
- [8] Trabert, Andreas: Biologisch abbaubare Kunststoffe. Facharbeit, Phillips-Universität Marburg, 2010.
- [9] FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (Hrsg.): Biologisch Abbaubare Werkstoffe. Gülzow.
- [10] Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk (Hrsg.): Mater-Bi – eine biologisch abbaubare Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen. Straubing, 2006.
- [11] Achim, Pfeil et al. : Biologisch abbaubare Kunststoffe. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994. Thermoplastische Stärke Mater-Bi
- [12] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 7.4 Environmental Degradation of Poly(Lactid Acid)
- [13] Materbi - bioplastica biodegradabile e compostabile. L'originale.; Biologischer Abbau von Mater-Bi ( Letzter Zugriff: 14.07.2022; 20:45)
- [14] Ecovio® (PBAT, PLA) (basf.com); Informationen über ecovio®(14.07.2022; 22:05)
- [15] Sinha Ray, Suprakas: Environmentally friendly polymers nanocomposites. Types, processing and properties. Woodhead Publishing, Oxford, 2013. 2.4.4 Poly (butylene adipate-co-terephthalate)
- [16] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 2.2 Lactic Acid Production
- [17] Michel, K.: Biologisch abbaubare Werkstoffe Stand der Forschung und Entwicklung zur Anwendung bioabbaubarer Verpackungsmaterialien. ABB Turbo Systems AG, Zürich, 2004.

- [18] Thielen, Michael: Biokunststoffe Grundlagen, Anwendungen, Märkte. Polymedia Publisher, Mönchengladbach, 2014. 3.4.1 Biobasierte Polyester
- [19] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 1.3 General Properties and Applications of Polylactic Acid
- [20] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 2.4 Catalysts for Polymerization of Poly(Lactic Acid)
- [21] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 7.3 Hydrolytic and Enzymatic Degradation of Poly(Lactic Acid)
- [22] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 7.2 Factors Affecting Poly(Lactic Acid) Degradation
- [23] Achim, Pfeil et al. : Biologisch abbaubare Kunststoffe. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994. Abbaubare Kunststoffe aus Milchsäure
- [24] Galalith (chemie.de); Informationen über Galalith (Letzter Zugriff: 19.07.2022; 23:02)
- [25] Thielen, Michael: Biokunststoffe im Auto, 2011. S. 3-6
- [26] Welzel, Katharina: Einfluss der chemischen Struktur auf die enzymatische Hydrolyse von Polyester-Nanopartikel. Dissertation der TU Braunschweig, 2003. 3.1 Biologisch abbaubare Polymere
- [27] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.1 Voraussetzungen der Kompostierung
- [28] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.1.4. pH-Wert
- [29] Satyanarayana, Tulasi: Thermophilic microbes in environmental and industrial biotechnology. Biotechnology of Thermophiles. Springer, Dordrecht, 2013. 5 Role of Thermophilic Microflora in Composting
- [30] Monitoring Compost pH - Cornell Composting; pH-Wert während der Kompostierung (Letzter Zugriff: 03.06.2022; 17:40)
- [31] Diaz, Luis F.: Compost science and technology. Elsevier, Amsterdam, 2007. 4.2 Environmental Factors
- [32] Kolarek, Martina: Kompostieren!. Biologisch, einfach, schnell. Eugen Ulmer, 2018
- [33] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.1.1 Wassergehalt
- [34] Fricke, Klaus et al.: Grundlagen der Kompostierung. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 1990. 1.1 Bioabfall

- [35] Heribert, Insam et al.: Microbiology of Composting. Springer, New York, 2002. N-Dynamics During Composting – Overview and Experimental Results
- [36] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Ammoniak und Ammonium. Augsburg, 2018.
- [37] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.1.3. Kohlenstoff-/ Stickstoffverhältnis
- [38] Porenvolumen - Lexikon der Biologie (spektrum.de); Porenvolumen (Letzter Zugriff: 27.06.2022; 19:36)
- [39] Primärporen - Lexikon der Geowissenschaften (spektrum.de); Primärporen (Letzter Zugriff: 27.06.2022; 19:38)
- [40] Sekundärporen - Lexikon der Geowissenschaften (spektrum.de); Sekundärporen(Letzter Zugriff: 27.06.2022; 19:41)
- [41] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.1.2. Porenvolumen
- [42] Bauer, Werner P.: Kompostierung von Bioabfällen Seminar. Akademischer Verlag, München, 1993. 2.2. Der Rotteverlauf
- [43] Kompost - Die Basis - komposttee.ch; Temperaturverlauf (Letzter Zugriff: 13.06.2022; 19:36)
- [44] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Richtig Kompostieren. Dessau-Rosslau, 2015.
- [45] Diaz, Luis F.: Compost science and technology. Elsevier, Amsterdam, 2007. 3.5 The Microorganisms Involved
- [46] Bakterium - DocCheck Flexikon ; Bakterien (Letzter Zugriff: 17.08. 2022; 21:59)
- [47] Anon: Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications. IntechOpen, Kroatien, 2016.
- [48] Archaea - DocCheck Flexikon ; Archea (Letzter Zugriff: 29.07. 2022; 14:49)
- [49] Pilze – Fungi in Biologie | Schülerlexikon | Lernhelfer ; Pilze (Letzter Zugriff: 03.08. 2022; 16:29)
- [50] Die Bedeutung der Regenwürmer - www.regenwuermer.info ; Informationen zu Regenwürmer (Letzter Zugriff: 10.08. 2022; 19:37)
- [51] Baumwolle – Chemie-Schule ; Aufbau Baumwolle (Letzter Zugriff: 08.08. 2022; 15:33)
- [52] Papier – Chemie-Schule ; Aufbau Papier (Letzter Zugriff: 08.08. 2022; 15:47)
- [53] Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 5.2 Effect of Crystallinity and Molecular Weight on the Mechanical Properties of Poly(Lactic Acid)



## Abbildungsverzeichnis

Titelbild: [https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-05/QST7\\_Resch\\_neu.pdf](https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2021-05/QST7_Resch_neu.pdf) (Letzter Zugriff: 15.10.2022; 15:56)

Abb.1: Abgrenzung von konventionellen, biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen auf nachwachsender und fossiler Basis. Quelle: [Kunststoffprodukte in der Baubranche: Vorteile, Probleme, Lösungsansätze - Klimaforum Bau \(klimaforum-bau.de\)](#) (Letzter Zugriff: 13.07.2022; 13:00)

Abb. 2: Zertifikat für biobasierte Produkte. Quelle: [https://www.dincertco.de/media/dincertco/zertifikatszeichen/din-geprueft-biobased-85\\_core\\_1\\_x.jpg](https://www.dincertco.de/media/dincertco/zertifikatszeichen/din-geprueft-biobased-85_core_1_x.jpg) (Letzter Zugriff: 28.07.2022; 14:23)

Abb. 3: EN 13432 Zertifikat. Quelle: <https://lirp.cdn-website.com/e3d62149/dms3rep/multi/opt/Compost-01-640w.png> (Letzter Zugriff: 01.08.2022; 12:00)

Abb. 4: ASTM International Logo. Quelle: <https://seeklogo.com/images/A/astm-international-logo-1EDE8F2E3C-seeklogo.com.png> (Letzter Zugriff: 01.08.2022; 15:00)

Abb. 5: Systematik von Biokunststoffen in Bezug auf ihre biologische Abbaubarkeit und auf die Rohstoffe. Quelle: UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (2009): Biologisch abbaubare Kunststoffe. Dessau-Rosslau

Abb. 6: Polymerblend (links) mit drei verschiedenen Polymeren, Copolymer (rechts) mit den Monomeren A und B. Quelle: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/60/Alternating\\_copolymer\\_3D.svg/2560px-Alternating\\_copolymer\\_3D.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/60/Alternating_copolymer_3D.svg/2560px-Alternating_copolymer_3D.svg.png) (Letzter Zugriff: 08.07.2022; 19:45)

Abb. 7: Zertifikate für die biologische Abbaubarkeit vom Material Mater-Bi. Quelle: <https://materbi.com/de/zertifikate/> (Letzter Zugriff: 10.07.2022; 18:44)

Abb. 8: Zertifikate für den biologisch abbaubaren Kunststoff Ecovio®. Quelle: [https://plastics-rubber.basf.com/global/de/performance\\_polymers/products/ecovio.html](https://plastics-rubber.basf.com/global/de/performance_polymers/products/ecovio.html) (Letzter Zugriff: 14.07.2022; 22:27)

Abb. 9: Darstellung der möglichen Copolymere auf Basis von ecoflex. Quelle: [https://plastics-rubber.basf.com/global/de/performance\\_polymers/products/ecoflex.html](https://plastics-rubber.basf.com/global/de/performance_polymers/products/ecoflex.html) (Letzter Zugriff: 12.07.2022; 16:12)

Abb. 10: Strukturformel der beiden Enantiomere L-Milchsäure und D-Milchsäure. Quelle: Selbst dargestellt mit: [https://de.wikipedia.org/wiki/Milchs%C3%A4ure#:~:text=Milchs%C3%A4ure%20\(lat.,Bezeichnung%20%2DHydroxypropans%C3%A4ure%20zu%20verwenden](https://de.wikipedia.org/wiki/Milchs%C3%A4ure#:~:text=Milchs%C3%A4ure%20(lat.,Bezeichnung%20%2DHydroxypropans%C3%A4ure%20zu%20verwenden) (Letzter Zugriff: 14.07.2022; 12:27)

Abb. 11: Die verschiedenen PLA-Typen aus den beiden Stereoisomeren. Quelle: [https://th.bing.com/th/id/R.34b2e90e20859b6cda68abca40589a87?rik=VuEWdxF7%2bWUFjA&riu=http%3a%2f%2fasp.plastics.or.th%3a8001%2fckfinder%2fuserfiles%2fimages%2fpl2\(1\).jpg&ehk=cHw%2fWBN1HTfGEf9cu66Tgm3KAye6SbGze-EgtwD0kg3A%3d&risl=&pid=ImgRaw&r=0](https://th.bing.com/th/id/R.34b2e90e20859b6cda68abca40589a87?rik=VuEWdxF7%2bWUFjA&riu=http%3a%2f%2fasp.plastics.or.th%3a8001%2fckfinder%2fuserfiles%2fimages%2fpl2(1).jpg&ehk=cHw%2fWBN1HTfGEf9cu66Tgm3KAye6SbGze-EgtwD0kg3A%3d&risl=&pid=ImgRaw&r=0) (Letzter Zugriff: 29.07.2022; 12:19)

Abb. 12: Polymerisationswege für die Produktion von PLA. Quelle: Sin, Lee Tin: Polylactic acid a practical guide for the processing, manufacturing, and applications of PLA. Elsevier William Andrew, Norwich, 2019. 2.4 Catalysts for Polymerization of Poly(Lactic Acid)

Abb. 13: Fragmentierung von PLA zu Oligomeren (Polymere mit geringer Kettenlänge) und anschließend zu Monomeren. Quelle: Erstellt mit KingDraw

Abb. 14: Abbau von PLA bei 37 °C bei pH 7. Quelle: Achim, Pfeil et al. : Biologisch abbaubare Kunststoffe. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994. PLA

Abb. 15: Metabolisierung von Polymeren auf Milchsäurebasis mit reinem PLA ganz links. Quelle: Achim, Pfeil et al. : Biologisch abbaubare Kunststoffe. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994. PLA

Abb. 16: Schildkröt-Puppe aus Celluloid (1950). Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schildkr%C3%B6t#/media/Datei:Schildkroett\\_Puppe\\_Inge\\_1950.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Schildkr%C3%B6t#/media/Datei:Schildkroett_Puppe_Inge_1950.jpg) (Letzter Zugriff: 20.07.2022; 13:00)

Abb. 17: Knöpfe aus Casein (1920). Quelle: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (Hrsg.) (2020): Biokunststoffe. Gülzow.

Abb. 18: Auto aus biobasiertem Kunststoff (1941). Quelle: [The history of bioplastics timeline | Timetoast timelines](#) (Letzter Zugriff: 19.07.2022; 20:14)

Abb. 19: Zellglas. Quelle: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (Hrsg.): Biologisch Abbaubare Werkstoffe. Gülzow.

Abb. 20: Anstieg der Patentaktivität auf dem Gebiet der modernen Biokunststoffe. Quelle: FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE e. V. (Hrsg.): Biologisch Abbaubare Werkstoffe. Gülzow.

Abb. 21: Verschiedene Arten von Kunststoffen und ihr molekularer Aufbau, mit den kristallinen Stellen im teilkristallinen Thermoplast rot eingefärbt. Quelle: [https://tu-dresden.de/mn/chemie/mc/mc1/ressourcen/dateien/studium/bachelor-chemie/Struktur-Eigenschaft\\_MCII\\_WS18\\_19.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/mn/chemie/mc/mc1/ressourcen/dateien/studium/bachelor-chemie/Struktur-Eigenschaft_MCII_WS18_19.pdf?lang=de)

Abb. 22: Jährliche Schwankung des pH-Wertes im Bioabfall von Witzenhausen. Quelle: Fricke, Klaus et al.: Grundlagen der Kompostierung. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 1990.

Abb. 23: Typischer Temperaturverlauf einer *Kompostmiete*. Quelle: Pfirter, A. et al. zitiert in Bauer, Werner.

Abb. 24: Schematische Darstellung vom mikrobiellen Abbau von Polymeren. Quelle: Neff-Koster, A.: Mikrobieller Abbau von biologisch abbaubaren Werkstoffen in Erde und Kompost. St. Gallen, EMPA-Bericht 254, 2001.

Abb. 25: Darstellung der Bakterien- und Pilz-Flora sowie der gesamten Mikroorganismen-Kultur in Relation zur Temperatur. Quelle: Diaz, Luis F.: Compost science and technology. Elsevier, Amsterdam, 2007.

Abb. 26: Darstellung von den Actinosynnema ausgebildeten Hyphen. Quelle: Anon: Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications. IntechOpen, Kroatien, 2016.

Abb. 27: Schematische Darstellung von Regenwurmgingen im Boden. Quelle: Die Bedeutung der Regenwuermer - [www.regenwuermer.info](http://www.regenwuermer.info) (Letzter Zugriff: 10.08. 2022; 20:03)

Abb. 28: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Quelle: Selbst gestaltet mit Photoshop

Abb. 29: Wägung vom Material ecovio® in der Woche 3 aus 3 Perspektiven nach 24h Konditionierung

Abb. 30: Temperaturverlauf der Komposttemperatur sowie der Aussentemperatur und die Luftfeuchtigkeit in der Kompostumgebung während 12 Wochen

Abb. 31: Verlauf des pH-Wertes des Kompostes binnen 12 Wochen

Abb. 32: Das C/N-Verhältnis der Rohmaterialien, welche dem Kompost hinzugefügt wurden

Abb. 33: Biologischer Abbau der Positivproben Papier und Baumwolle binnen 12 Wochen

Abb. 34: Biologische Desintegration der BAW ecovio®, Mater-Bi und PLA in Bezug auf die Positivproben Papier respektive Baumwolle und Negativproben PE respektive rPET

Abb. 35: Biologische Desintegration von Mater-Bi innert 12 Wochen

Abb. 36: Visueller Abbau von Ecovio während 12 Wochen

Abb. 37: Biologischer Abbau von PLA binnen 12 Wochen

Abb. 38: Biologischer Abbau von PLA während 12 Wochen

Abb. 39: Biologischer Abbau von PE während 12 Wochen

Abb. 40: Biologischer Abbau von rPET innert 12 Wochen

Alle Lewisformeln im Abschnitt PLA wurden mit KingDraw erstellt

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Labels, welche die biologische Abbaubarkeit überprüfen und die dazugehörigen Prüfungsverfahren und Normen sowie die dazugehörige Organisation mit dem korrespondierenden Organisationssitz

Tabelle 2: C/N-Verhältnis der Rohmaterialien und den neuen Rohmaterialien. Quelle: [http://kompostwiki.de/anleitungen/die\\_richtige\\_mischung\\_finden](http://kompostwiki.de/anleitungen/die_richtige_mischung_finden) (26.08.2022; 15:23)

Tabelle 3: Die Materialien mit den entsprechenden Herstellern, den zertifizierten Normen und dem Produkt, aus welchem die Probe entnommen wurde

Tabelle 4: Massenverlust der beiden Positivproben Baumwolle und Papier in % innert 84 Tagen

Tabelle 5: Bio: Biologische Desintegration von Mater-Bi, ecovio® und PLA innert 12 Wochen in %

## Anhang

### Aufbau Kompost



Im Uhrzeigersinn von oben links nach unten links:

**Versuchsaufbau (Thermokompost); Kompost auf Gitternetz; Drainage; vollgefüllter Kompost mit Kabel der Sonde und Temperaturanzeige; Sonde mit Plastikummantelung; Position der Proben mit der Sonde in Woche 12; Position der Proben mit der Sonde in Woche 0**

### Biozönose



Rosenkäferlarve im Komposthaufen

Myzel von Actinobacteria in Woche 5

## Rohmaterialien



**Rohmaterialmischung  
(Kompost und Rohmaterial)**

**Gleiche Rohmaterialmischung  
nach 2 Wochen**

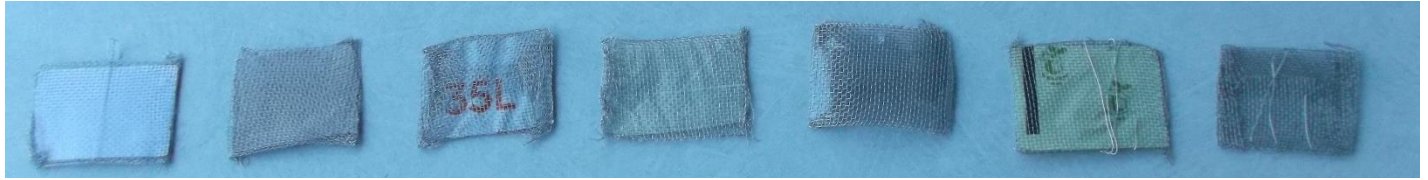
## pH-Wert



**pH-Messstreifen der Wochen 2, 5, 7, 10, 12  
von links nach rechts**

### Proben

#### Woche 0



Papier

Baumwolle

Müllbeutel  
(PE)

Mater-Bi

rPET

ecovio®

PLA

Proben zu Beginn des Versuches

#### Woche 1



Papier

Baumwolle

Müllbeutel  
(PE)

Mater-Bi

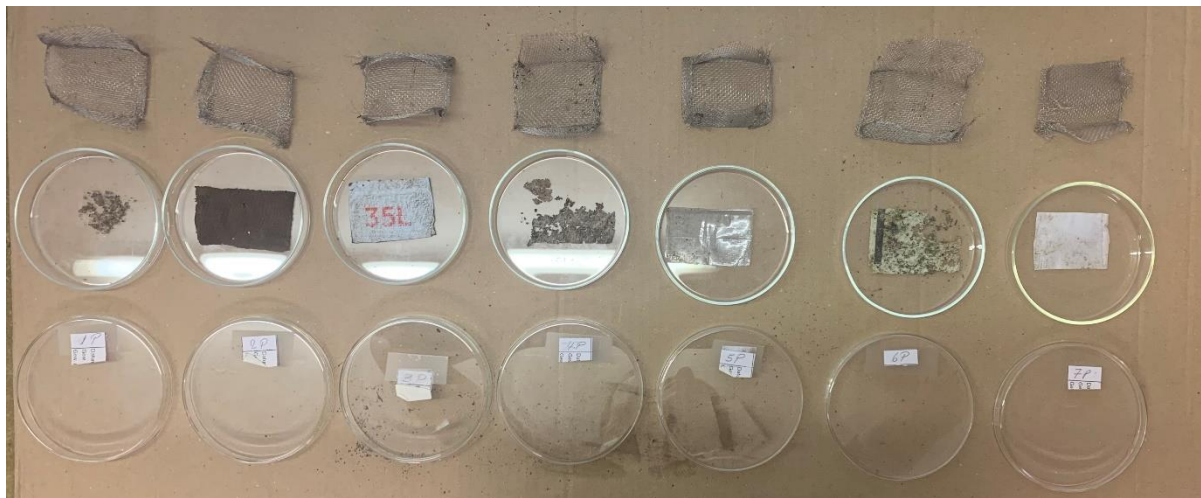
ecovio®

rPET

PLA

Proben in der Woche 1 nach Säuberung

#### Woche 3



Papier

Baumwolle

Müllbeutel  
(PE)

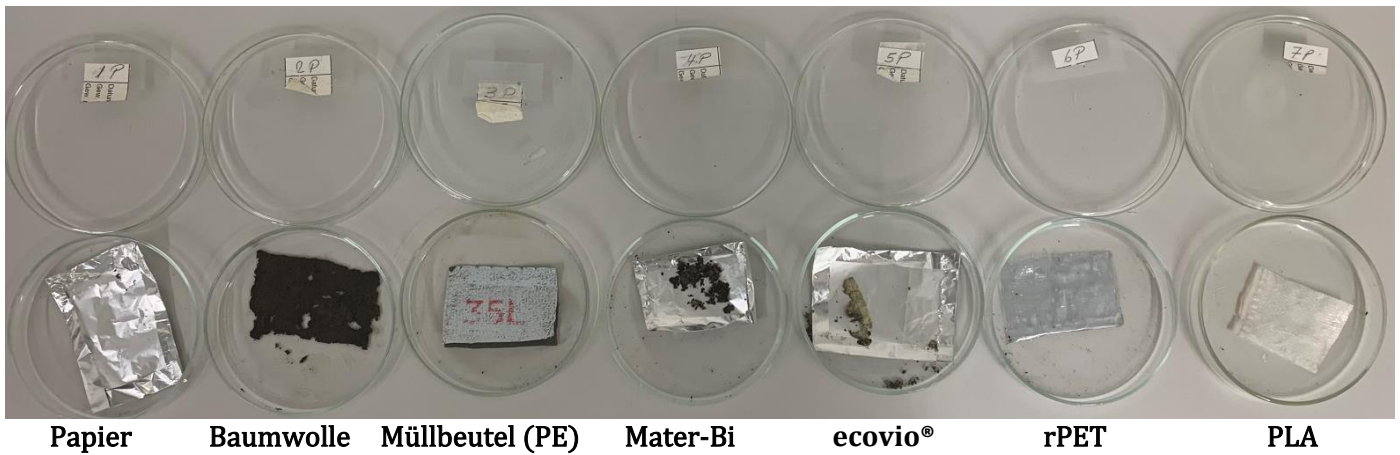
Mater-Bi

rPET

ecovio®

PLA

Proben in den Petrischalen 1-7 mit den Drahtgittern (oben) in der Woche 3

**Woche 5**

**Proben in den Petrischalen 1-7 nach 24h Konditionierung**

**bei (22 °C/ 48% rF) in der Woche 5**

## Datenblätter Wägung

| <b>Gewicht Proben</b> |                       |         |           |           |              |         |
|-----------------------|-----------------------|---------|-----------|-----------|--------------|---------|
| Datum                 | Art                   | Gewicht |           |           |              | Prozent |
|                       |                       | in mg   | Gewicht 2 | Gewicht 3 | Durchschnitt |         |
| 11.06.2022            | Papier                | 195,571 | 195,559   | 195,558   | 195,563      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 445,514 | 445,53    | 445,532   | 445,525      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Bio-Beutel (ecovio®)  | 148,674 | 148,664   | 148,668   | 148,669      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Plastikbecher (rPET)  | 536,146 | 536,153   | 536,379   | 536,226      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 198,36  | 198,377   | 198,318   | 198,352      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Müllbeutel (PE)       | 207,715 | 207,701   | 207,698   | 207,705      | 100,0   |
| 11.06.2022            | Baumwolle             | 437,634 | 437,666   | 437,406   | 437,569      | 100,0   |
| 19.06.2022            | Papier                | 118,712 | 118,706   | 118,677   | 118,698      | 60,7    |
| 19.06.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 445,76  | 445,754   | 445,751   | 445,755      | 100,1   |
| 19.06.2022            | Bio-Beutel (ecovio®)  | 146,738 | 146,736   | 146,738   | 146,737      | 98,7    |
| 19.06.2022            | Plastikbecher (rPET)  | 536,232 | 536,23    | 536,234   | 536,232      | 100,0   |
| 19.06.2022            | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 159,812 | 159,811   | 159,811   | 159,811      | 80,6    |
| 19.06.2022            | Müllbeutel (PE)       | 208,338 | 208,348   | 208,35    | 208,345      | 100,3   |
| 19.06.2022            | Baumwolle             | 436,573 | 436,57    | 436,562   | 436,568      | 99,8    |
| 03.07.2022            | Papier                | 46,295  | 46,306    | 46,306    | 46,302       | 23,7    |
| 03.07.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 445,885 | 445,926   | 445,923   | 445,911      | 100,1   |
| 03.07.2022            | Bio-Beutel (ecovio®)  | 139     | 139,381   | 139,387   | 139,379      | 93,8    |
| 03.07.2022            | Plastikbecher (rPET)  | 540,642 | 540,645   | 540,644   | 540,644      | 100,8   |
| 03.07.2022            | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 104     | 103,612   | 103,61    | 103,606      | 52,2    |
| 03.07.2022            | Müllbeutel (PE)       | 213,798 | 213,803   | 213,803   | 213,801      | 102,9   |
| 03.07.2022            | Baumwolle             | 400,798 | 400,803   | 400,803   | 400,801      | 91,6    |
| 17.07.2022            | Papier                | 2,384   | 2,39      | 2,389     | 2,388        | 1,2     |
| 17.07.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 446,459 | 446,454   | 446,451   | 446,455      | 100,2   |
| 17.07.2022            | Bio-Beutel (ecovio)   | 52,8    | 52,796    | 52,792    | 52,796       | 35,5    |
| 17.07.2022            | Plastikbecher (rPET)  | 536,273 | 536,274   | 536,276   | 536,274      | 100,0   |
| 17.07.2022            | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 58,274  | 58,275    | 58,274    | 58,274       | 29,4    |
| 17.07.2022            | Müllbeutel (PE)       | 209,972 | 209,981   | 209,978   | 209,977      | 101,1   |
| 17.07.2022            | Baumwolle             | 289,505 | 289,524   | 289,539   | 289,523      | 66,2    |
| 27.07.2022            | Papier                | 0,845   | 0,855     | 0,855     | 0,852        | 0,4     |
| 27.07.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 446,401 | 446,404   | 446,404   | 446,403      | 100,2   |
| 27.07.2022            | Bio-Beutel (ecovio®)  | 10,099  | 10,1      | 10,096    | 10,098       | 6,8     |
| 27.07.2022            | Plastikbecher (rPET)  | 536,26  | 536,265   | 536,265   | 536,263      | 100,0   |
| 27.07.2022            | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 19,764  | 19,77     | 19,769    | 19,768       | 10,0    |
| 27.07.2022            | Müllbeutel (Gemeinde) | 210,622 | 210,636   | 210,638   | 210,632      | 101,4   |
| 27.07.2022            | Baumwolle             | 242,382 | 242,385   | 242,385   | 242,384      | 55,4    |
| 21.08.2022            | Papier                | 0       | 0         | 0         | 0,000        | 0,0     |
| 21.08.2022            | Plastikbecher (PLA)   | 447,836 | 447,835   | 447,826   | 447,832      | 100,5   |
| 21.08.2022            | Bio-Beutel (ecovio®)  | 2,327   | 2,33      | 2,33      | 2,329        | 1,6     |



---

|            |                       |         |         |         |         |       |
|------------|-----------------------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 21.08.2022 | Plastikbecher (rPET)  | 536,783 | 536,784 | 536,786 | 536,784 | 100,1 |
| 21.08.2022 | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 2,321   | 2,327   | 2,326   | 2,325   | 1,2   |
| 21.08.2022 | Müllbeutel (PE)       | 216,022 | 216,036 | 216,018 | 216,025 | 104,0 |
| 21.08.2022 | Baumwolle             | 166,624 | 166,623 | 166,614 | 166,620 | 38,1  |
| 04.09.2022 | Papier                | 0       | 0       | 0       | 0,000   | 0,0   |
| 04.09.2022 | Plastikbecher (PLA)   | 447,594 | 447,586 | 447,58  | 447,587 | 100,5 |
| 04.09.2022 | Bio-Beutel (ecovio®)  | 0       | 0       | 0       | 0,000   | 0,0   |
| 04.09.2022 | Plastikbecher (rPET)  | 537,096 | 537,108 | 537,107 | 537,104 | 100,2 |
| 04.09.2022 | Bio-Beutel (Mater-Bi) | 0       | 0       | 0       | 0,000   | 0,0   |
| 04.09.2022 | Müllbeutel (PE)       | 210,582 | 210,6   | 210,604 | 210,595 | 101,4 |
| 04.09.2022 | Baumwolle             | 130,36  | 130,09  | 129,81  | 130,087 | 29,7  |

---